



**Technische
Universität
Braunschweig**



Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Faserverbundleichtbau
und Adaptionik



Konzept zur Integration gekrümmter Leiterbahnen in einem Faserverbundaufbau mit Hilfe der FML Technologie

Studienarbeit

an der Technischen Universität Braunschweig

Verfasser:	Sönke Heuer
Im Studiengang:	Maschinenbau
Matr.-Nr.:	4876276

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne (TU Braunschweig IAF)

Betreuer:

M.Sc. Alexander Pototzky (DLR)

Betreuer:

M.Sc. Patrick Scholle (TU Braunschweig IAF)

Bearbeitungszeitraum: 3 Monate

Abgabedatum am: 07.08.2019

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben.

Die Arbeit wurde im Rahmen des Masterstudiums an der Technischen Universität Braunschweig erstellt und bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ort, Datum, Unterschrift

Inhalt

Kurzbeschreibung	IV
Abstract	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
Formelverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Grundlagen von Faser-Metall-Laminaten	2
2.2 Fertigungsbedingte Einflüsse auf die Endkontur von CFK-Bauteilen	4
2.2.1 Spring-In-Effekt	4
2.2.2 Warpage	5
2.2.3 Forced Interaction	6
2.2.4 Bi-Metall-Effekt	7
2.3 Metallumformung	8
2.3.1 Grundlagen der Metallumformung	8
2.4 Fertigungsverfahren – Blechumformung	12
2.4.1 Streckziehen	12
2.4.2 Tiefziehen	12
2.4.3 Biegen	13
2.4.4 Inkrementelle Blechumformung	15
3 Probenfertigung	16
3.1 Grundlegender Fertigungsablauf	16
3.2 Konzepterarbeitung zur Preform-Herstellung	17
3.2.1 Vorformen durch ein Vakuumdiaphragma	17
3.2.2 Vorformen durch das Eigengewicht des Werkzeugs	18
3.2.3 Einlegen vorgeformter Folien	19
3.3 Auswahl geeigneter Lagenaufbauten	20
3.4 Vorbehandlung der Stahlfolien	23
3.4.1 Auswahl des Umformprozesses	23
3.4.2 Umformen der Stahlfolien	26
3.4.3 Sol-Gel-Prozess	29

3.5	Umsetzen der Konzepte	29
3.5.1	Werkzeugmodifikation	30
3.5.2	Herstellung der Bauteile	31
4	Auswertung	35
4.1	Beschreibung der Auswertungsmethoden & Erstellung der Messdaten	35
4.2	Auswertung der Messdaten	36
4.2.1	Auswertung des CFK-Referenzbauteils	36
4.2.2	Auswertung der Bi-Metall-Bauteile	39
4.2.3	Auswertung der Zwei-Folien-Bauteile	42
4.2.4	Eigenspannungsanalyse	44
4.3	Bewertung und Zusammenfassung der Ergebnisse	47
5	Zusammenfassung	49
6	Ausblick	50
7	Literaturverzeichnis	51
Anhang A	XI
Anhang B	XVII
Anhang C	XXIII
Anhang D	XXV

Kurzbeschreibung

Die Integration von Leiterbahnen in tragende Faserverbundstrukturen bietet großes Potential zur Gewichtseinsparung. So wurde die Fertigung von Platten in Faser-Metall-Laminat-Bauweise in den letzten Jahren am DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) intensiv untersucht, während die Überführung auf gekrümmte Strukturen noch weitestgehend offen ist.

Auf Basis einer eingehenden Literaturrecherche und der Einarbeitung in die theoretischen Grundlagen sollen Konzepte zur Integration von Metallfolien in gekrümmte Faserverbundstrukturen entwickelt werden, welche durch anschließend anhand eines Probenprogramms untersucht und ausgewertet werden. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Erstellung der Preforms und dem Einfluss des verwendeten Verfahrens auf die Endgeometrie und Eigenspannungen der gefertigten Probekörper. Die Probenfertigung sowie die Versuchsdurchführung und -auswertung finden in den Laboren des DLR Braunschweig statt. Die Ergebnisse werden abschließend dokumentiert.

Abstract

The integration of conductor paths in load-bearing fibre composite structures offers great potential for weight savings. The building process of fibre-metal laminate panels has been intensively studied at DLR (German Aerospace Center) in the last few years, while the transfer to curved structures is widely uncharted.

Based on an in-depth literature study and the into the theoretical basis, concepts for the integration of metal foils into curved fibre composite structures are to be developed, which will then be examined and evaluated by means of a sample program. The focus is on the production of preforms and the influence of the process used to reshape the foils on the residual stresses of the manufactured test specimens. The preparation of the specimens as well as the evaluation of the tests take place in the laboratories of DLR Braunschweig. The results are documented in the end.

Abkürzungsverzeichnis

Arall	Aramid Fibre Reinforced Aluminium Laminate
CAD	Computer Aided Design
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und- Raumfahrt
FML	Faser-Metall-Laminat
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
Glare	Glasfaserverstärktes Aluminium

Formelverzeichnis

A	Fläche
b	Breite des Körpers
C	Werkstoffspezifische Konstante
h	Höhe des Körpers
F	Kraft
k	Schubfließspannung
k_f	Schubfließspannung im einachsigen Spannungszustand
l	Länge des Körpers
N	Verfestigungsexponent
$R_{p0,2}$	Dehngrenze
S_1	Querschnitt
T	Temperatur
V	Volumen
α_R	Thermischer Anteil der Dehnung in radialer Richtung
α_T	Thermischer Anteil der Dehnung in tangentialer Richtung
α_{th}	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
β_R	Chemischer Anteil der Dehnung in radialer Richtung
β_T	Chemischer Anteil der Dehnung in tangentialer Richtung
$\Delta\varphi$	Differenz des tatsächlichen Winkels zum Soll-Winkel $\tilde{\varphi}$
ΔT	Temperaturdifferenz
$\varepsilon_l, \varepsilon_b, \varepsilon_h$	Dehnung der jeweiligen Raumrichtung
ε_R	Dehnung in radialer Richtung
ε_T	Dehnung in tangentialer Richtung
$\varphi_l, \varphi_b, \varphi_h$	Umformgrad der jeweiligen Raumrichtung
$\tilde{\varphi}$	Soll-Winkel
φ_g^n	Logarithmische Hauptformänderung
φ_v	Logarithmische Vergleichsformänderung
σ_1	Hauptnormalspannung im einachsigen Spannungszustand
σ_{max}	Größte positive Hauptnormalspannung
σ_{min}	Größte negative Hauptnormalspannung
σ_v	Vergleichsspannung
τ_{max}	Größte Schubspannung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schematische Darstellung des Fibre Bridging [8]	3
Abbildung 2 Schematische Darstellung des Spring-In-Effekts [13]	4
Abbildung 3 Betrachtete Richtungen in der analytischen Methode nach Radford [15]	5
Abbildung 4 Schematische Darstellung der Entstehung des Warpage-Effekts nach [15]	6
Abbildung 5 Überlagerung von Spring-In und Warpage [16]	6
Abbildung 6 Spannungszustand hervorgerufen durch die räumliche Ausdehnung des Werkzeugs im Forced Interaction Effekt [14]	7
Abbildung 7 Verformung ausgelöst durch den Bi-Metall-Effekt nach [17]	7
Abbildung 8 Eigenspannungen in GLARE [15]	8
Abbildung 9 Mohrsche Spannungskreise mit dazugehörigen Spannungszuständen [18]	10
Abbildung 10 allg. & temperaturabhängige Fließkurven [19]	11
Abbildung 11 Schematische Darstellung des a) einfachen Streckziehens b) Tangentialstreckziehens [19]	12
Abbildung 12 a) Tiefziehen im Erstzug b) Tiefziehen im Weiterzug [18] [19]	13
Abbildung 13 Schematische Darstellung von Biegen im a) V-Gesenk b) U-Gesenk [19]	14
Abbildung 14 Schematische Darstellung des des Rundbiegens / Walzrundens [20]	14
Abbildung 15 inkrementelle Blechumformung [21]	15
Abbildung 16 Schematische Darstellung des Diaphragma-Aufbaus zum Vorformen der Laminate	18
Abbildung 17 Schematische Darstellung des Umformens der Laminare durch Eigengewicht des Werkzeugs	19
Abbildung 18 Abfolge der vier notwendigen Schritte zum händischen Blechbiegen der Omega-Form	27
Abbildung 19 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 1 gegen das Stempelseiten CAD-Modell	28
Abbildung 20 Werkzeug vor Modifikationen aus CAD	30
Abbildung 21 Werkzeug nach Modifikationen	30
Abbildung 22 Auffälligkeiten bei den entformten, unbesäumten, vorgeformten Bauteilen nach dem Pressgang	32
Abbildung 23 Nicht vollständiges Schließen beim Umformen unter Eigengewicht des Werkzeugs	32
Abbildung 24 Auffälligkeiten bei den entformten unbesäumten durch Eigengewicht des Werkzeugs umgeformten Bauteilen	33
Abbildung 25 Vorformen mit Diaphragma unter Vakuum	34
Abbildung 26 Vorgeformte Bauteile nach Entfernen des Diaphragmas	34
Abbildung 27 Auffälligkeiten bei den entformten durch das Diaphragma umgeformten Bauteilen	34

Abbildung 28 Soll-Maße des fertigen Omega-Profiles aus dem CAD	35
Abbildung 29 Fitting der Ebenen zur Ermittlung des Spring-In.....	36
Abbildung 30 Winkel zwischen den Fitting-Ebenen zur Ermittlung des Spring-In.....	36
Abbildung 31 Abweichungsanalyse der CFK-Referenz gegen das CAD-Soll-Modell	37
Abbildung 32 Schnittansicht des Soll-Ist-Vergleichs zwischen CFK-Referenz und CAD-Modell	38
Abbildung 33 Exemplarische Abweichungsanalyse der Bi-Metall-Laminate gegen das CAD-Modell	40
Abbildung 34 Schnittansicht des Soll-Ist-Vergleichs aller Bi-Metall-Laminate und dem CAD-Modell	41
Abbildung 35 Ausschnitt des rechten Winkels der Schnittansicht des Soll-Ist-Vergleichs aller Bi-Metall-Laminate und dem CAD-Modell.....	41
Abbildung 36 Exemplarische Abweichungsanalyse der Zwei-Folien-Laminate mit vorgeformter Folie gegen das CAD-Modell.....	43
Abbildung 37 Exemplarische Abweichungsanalyse der Zwei-Folien-Laminate mit nicht vorgeformter Folie gegen das CAD-Modell.....	43
Abbildung 38 Schnittansicht des Soll-Ist-Vergleichs aller Zwei-Folien-Laminate und dem CAD-Modell.....	44
Abbildung 39 Ausschnitt des rechten Winkels der Schnittansicht des Soll-Ist-Vergleichs aller Zwei-Folien-Laminate und dem CAD-Modell	44
Abbildung 40 Bi-Metall-Aufbau mit vorgeformter Folie nach entfernen der Folie	46
Abbildung 41 Bi-Metall-Aufbau durch Eigengewicht des Werkzeugs umgeformt nach entfernen der Folie	46
Abbildung 42 Zwei-Folien-Aufbau mit vorgeformter Folie nach entfernen der Folie	47
Abbildung 43 Zwei-Folien-Aufbau durch Eigengewicht des Werkzeugs umgeformt nach entfernen der Folie	47
Abbildung 44 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 1 gegen das Muldenseiten CAD-Modell.....	XVII
Abbildung 45 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 2 gegen das Muldenseiten CAD-Modell.....	XVII
Abbildung 46 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 3 gegen das Muldenseiten CAD-Modell.....	XVIII
Abbildung 47 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 4 gegen das Muldenseiten CAD-Modell.....	XVIII
Abbildung 48 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 5 gegen das Muldenseiten CAD-Modell.....	XIX
Abbildung 49 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 6 gegen das Muldenseiten CAD-Modell.....	XIX

Abbildung 50 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 1 gegen das Stempelseiten-CAD-Modell	XX
Abbildung 51 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 2 gegen das Stempelseiten-CAD-Modell	XX
Abbildung 52 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 3 gegen das Stempelseiten-CAD-Modell	XXI
Abbildung 53 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 4 gegen das Stempelseiten-CAD-Modell	XXI
Abbildung 54 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 5 gegen das Stempelseiten-CAD-Modell	XXII
Abbildung 55 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 6 gegen das Stempelseiten-CAD-Modell	XXII
Abbildung 56 Abweichungsanalyse des Bi-Metall-Laminats 1 mit vorgeformter Folie gegen das CAD-Modell	XXIII
Abbildung 57 Abweichungsanalyse des Bi-Metall-Laminats 2 mit vorgeformter Folie gegen das CAD-Modell	XXIII
Abbildung 58 Abweichungsanalyse des Bi-Metall-Laminats umgeformt durch das Eigengewicht des Werkzeugs gegen das CAD-Modell	XXIV
Abbildung 59 Abweichungsanalyse des Zwei-Folien-Laminats 1 mit vorgeformter Folie gegen das CAD-Modell	XXV
Abbildung 60 Abweichungsanalyse des Zwei-Folien-Laminats 2 mit vorgeformter Folie gegen das CAD-Modell	XXV
Abbildung 61 Abweichungsanalyse des Zwei-Folien-Laminats mit nicht vorgeformter Folie umgeformt mit Hilfe des Diaphragmas gegen das CAD-Modell	XXVI
Abbildung 62 Abweichungsanalyse des Zwei-Folien-Laminats mit nicht vorgeformter Folie umgeformt durch das Eigengewicht des Werkzeugs gegen das CAD-Modell	XXVI

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Materialkennwerte des UD-Prepreg 8552/AS4.....	16
Tabelle 2 Materialkennwerte der verwendeten Stahllegierung 1.4310	17
Tabelle 3 Gegenüberstellung der 3 zu untersuchenden Lagenaufbauten mit der jeweiligen Lagenorientierung	22
Tabelle 4 Bewertungsmatrix zur Auswahl des Umformverfahrens	24
Tabelle 5 Auswertung der Bewertungsmatrix zur Auswahl des Umformverfahrens	25
Tabelle 6 Maximale Abweichungen der vorgeformten Folien.....	29
Tabelle 7 Winkelabweichungen des Referenzbauteils	37
Tabelle 8 Thermoelastische Eigenschaften des Prepregs AS4/8552 [16]	38
Tabelle 9 Radian der gefitteten Zylinder auf der CFK-Referenz.....	39
Tabelle 10 Winkelabweichungen der Bauteile mit Bi-Metall-Laminat	40
Tabelle 11 Radian der gefitteten Zylinder auf den Bi-Metall-Laminaten	42
Tabelle 12 Winkelabweichungen der Bauteile mit Zwei-Folien-Laminat.....	43
Tabelle 13 Radian der gefitteten Zylinder auf den Zwei-Folien-Laminaten.....	44
Tabelle 14 Öffnungswinkel der Schenkel vor und nach dem Entfernen der Metallfolien für die Bi-Metall- und die Zwei-Folien-Aufbauten	46

1 Einleitung

Das seit Jahren bestehende Bestreben Fahrzeugstrukturen leichter zu gestalten, um Kraftstoff zu sparen und Effizienz und Leistung zu erhöhen, führt dazu, dass immer leistungsfähigere Materialien benötigt werden, um die steigenden Anforderungen zu erfüllen. So finden faserverstärkte Kunststoffe (FVK), im Speziellen Carbon, schon seit Jahren Anwendung beispielsweise in der Formel 1 oder kürzlich in der Großserienfertigung des BMW i3. Der lagenartige Aufbau dieses Werkstoffs ermöglicht eine gute Anpassung des jeweiligen Bauteils an die auftretenden Lastfälle. Gleichzeitig ermöglicht es die Verbindung unterschiedlicher Materialien, sodass Mischverbunde aus Fasermaterialien, Kunststoff und Metall, sogenannte Faser-Metall-Lamine (FML) hergestellt werden können.

Diese Technologie ermöglicht die Integration von Leiterbahnen in tragende Strukturen, sodass beispielsweise Kabelbäume in Autos in die Primärstruktur des Fahrzeugs integriert werden können, was enormes Gewichtseinsparungspotenzial aufweist. Gleichzeitig können Montagezeiten und –aufwände gesenkt werden.

Für Platten ist die Integration von metallischen Leiterbahnen in die Faserverbundstruktur schon detailliert untersucht, während die Untersuchung gekrümmter Strukturen weitestgehend offen ist.

Gegenstand dieser Arbeit soll die Erarbeitung und Untersuchung unterschiedlicher Konzepte zur Integration von Metallfolien in eine gekrümmte Faserverbundstruktur sein. Hauptaugenmerk soll hierbei auf die Erstellung der Preforms aus Kohlenstofffaser-Prepregs und Metallfolien gelegt werden, da untersucht werden soll, welchen Einfluss das Vorformen der Lamine bzw. Laminatbestandteile auf die Endgeometrie der gefertigten Bauteile hat. Hierzu werden zunächst fertigungsrelevante Einflussparameter identifiziert, auf deren Basis drei Konzepte zur Integration der Folien entwickelt werden sollen. Zur Umsetzung dieser Konzepte müssen verschiedene Umformprozesse untersucht und bewertet werden. Anschließend soll ein Probenprogramm entwickelt werden, welches die erarbeiteten Konzepte und ihren Einfluss auf die Endgeometrie der gefertigten Bauteile untersucht. Hierzu müssen Lagenaufbauten entwickelt werden, die die erwarteten Effekte möglichst gut isolieren. Nach der Fertigung der Bauteile sollen diese vermessen und ausgewertet werden, sodass anhand der Ergebnisse die Einflussfaktoren des Vorformprozesses auf die Endgeometrie dargestellt werden können.

2 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel sollen alle relevanten theoretischen Grundlagen in Bezug auf Faser-Metall-Lamine (folgend als FML bezeichnet), fertigungsbedingte Einflüsse auf die Endgeometrie von Bauteilen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (folgend als CFK bezeichnet), Metallumformung und die gängigen Fertigungsverfahren der Blechumformung erörtert werden.

2.1 Grundlagen von Faser-Metall-Laminaten

Die ersten Studien bezüglich Faser-Metall-Laminaten wurden in den 70er Jahren in den Niederlanden durchgeführt, wobei in ersten Untersuchungen ausschließlich mehrere Metallbleche miteinander verklebt wurden. Ergebnis der Studie waren verbesserte Rissstoppereigenschaften und damit einhergehend ein verbessertes Ermüdungsverhalten [1].

Um Gewicht zu sparen und die Vorteile zweier Materialien mit spezifischen Eigenschaften zu verbinden, wurde kurz darauf der sogenannte Arall¹ Werkstoff entwickelt, ein Verbund aus Aramid und Aluminium, da Aramid gute Dämpfungs- und Impacteigenschaften aufweist. So konnte die Rissfortschrittsrate noch einmal um 100% gesteigert werden mit einer gleichzeitigen Gewichtseinsparung von 30%, was das Material für Luft- und Raumfahrtanwendungen interessant machte [2]. Aus fertigungstechnischer Sicht war das Material jedoch nur unter hohem Aufwand einsetzbar.

Das erste kommerziell genutzte und auch bis heute noch eingesetzte FML ist Glare, ein Verbund aus glasfaserverstärktem Kunststoff (folgend als GFK bezeichnet) und Aluminium. Die Hauptgründe für den Einsatz von Glare sind:

- Fibre Bridging: Risse werden umgeleitet und gestoppt
Dies führt zu verbessertem Ermüdungsverhalten
- Impact Resistenz
- Korrosionsverbesserung
- Verarbeitung ähnlich der Metallwerkstoffen

Da die Anforderungen an die Materialien immer weiter stiegen und auch immer noch steigen, wurden in den letzten Jahren viele neue Materialpaarungen entwickelt.

Ein logischer Schritt war der Einsatz von Hochleistungs-Kohlenstofffasern, was jedoch auch zu neuen Herausforderungen führte. In Kombination mit Aluminium kommt es zu einer stark ausgeprägten elektrochemischen Korrosion, so dass das Alu im Verbund stark angegriffen wird [3]. Aus dieser Problematik heraus entstanden Materialpaarungen von CFK mit Titan, hochlegierten Stählen und Magnesium [4]. Ein weiterer Punkt, der bei reinen Faser-Kunststoff-Verbunden zu vernachlässigen ist, ist die äußere witterungs- oder medienbedingte Korrosion. Diese ist abhängig vom Lagenaufbau und zu beachten, wenn die Metalllagen außen liegen [5].

¹ Arall = **A**ramid Fibre Reinforced **Al**uminium **L**aminate

In all diesen Verbunden sind immer die unterschiedlichen Thermalkoeffizienten der beiden Materialien zu beachten, die zu Eigenspannungen im Material führen (Siehe Kapitel 2.2.3).

Einsatz finden die Faser-Metall-Kombinationen an verschiedensten Stellen und haben unterschiedliche Vorteile.

So weisen FMLs deutlich verbesserte Crash-Eigenschaften in Bezug auf Impact oder Ermüdungsbrüche auf im Vergleich zu reinen faserverstärkten Kunststoffen (folgend als FVK bezeichnet). Ein Ermüdungsriß in beispielsweise einem zyklisch belasteten Glare-Verbund beginnt immer in den außen liegenden Metalllagen, da diese die größte Dehnung erfahren. Der Ermüdungsriß wird an die die Fasermetal-Grenzschicht umgeleitet, wo der Riss dann vorerst gestoppt wird, so dass dieser nicht in das Innere des Bauteils vordringen kann. Die Fasern bleiben intakt und erhalten so die Funktion des Bauteils, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Wegen der guten Ermüdungseigenschaften wird Glare z.B. in der Oberschale des Airbus A380 Rumpfes eingesetzt [6]. Außerdem absorbieren die Faser-Metall-Lamine durch die plastische Deformation der Metalllagen und das Versagen an den Interface-Stellen mehr Energie, was sich positiv auf das Crashverhalten auswirkt [7]. Die plastische Deformation hat auch noch den Vorteil der Schadensdetektion. Während reine FVK nach einem Impact äußerlich nur wenig bis gar keine Indikationen über beispielsweise entstandene Delaminationen und andere Schäden gibt, zeigt die plastische Deformation des Metalls einen entstandenen Impact-Schaden direkt an [1].

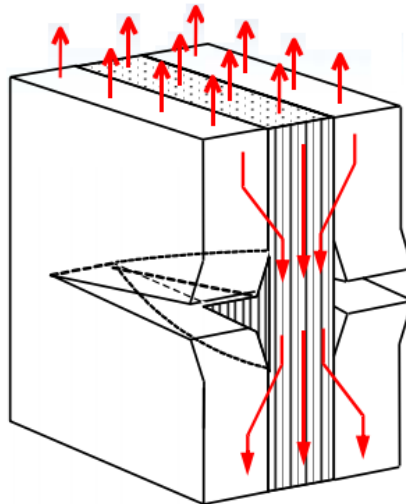


Abbildung 1 Schematische Darstellung des Fibre Bridging [8]

Ein weiterer Vorteil ist die Verbesserung spezifischer Materialkennwerte, die sich in höheren spezifischen Druckfestigkeiten und spezifischen Steifigkeiten ausdrückt. So können die Kennwerte eines CFK-Stahl-Verbundes im Vergleich zu einem reinen orthotropen CFK-Laminat um 13% bis 14% gesteigert werden [9].

Durch die lokale Hybridisierung von faserverstärkten Kunststoffen kann unter anderem die Lasteinleitung in das Bauteil deutlich verbessert werden. FVK weisen in reiner Form eine sehr schlechte Lochleibungsfestigkeit auf und müssen an Anschlussstellen beispielsweise eines Flugzeugflügels extrem aufgedickt werden, um die Lasten von Bolzen halten zu können. Durch den lokalen Einsatz von FML kann die Struktur ohne Aufdickung ein

Durchziehen von Bolzen verhindern, was auch dazu führt, dass kein Moment auftritt, da eine Aufdickung auch immer eine exzentrische Krafteinleitung zur Folge hat [10] [11].

Neben den rein strukturellen Aufgaben können FML auch zur gleichzeitigen Übertragung elektrischer Signale oder Wärme benutzt werden. Diese Funktionsintegration kann zu enormen Gewichtseinsparungen führen, z.B. könnten im Fahrzeugbau statt Kabelsträngen zur Signalführung in die Karosserie integrierte Leiterbahnen diese Aufgabe übernehmen und gleichzeitig zur Erhöhung der Kennwert beitragen [12].

2.2 Fertigungsbedingte Einflüsse auf die Endkontur von CFK-Bauteilen

Eine große Herausforderung in der Herstellung von Faserverbundbauteilen ist die genaue Abbildung der vorher im CAD erstellten Form. Die Hauptursache für diese Deformationen sind Eigenspannungen, die zum einen intrinsisch sind, wie z.B. Anisotropie des Verbundes, Harzschwind aufgrund der Vernetzungsreaktion, Aushärte- und Temperaturgradienten und unterschiedliche Ausdehnungen von Faser und Matrix, zum anderen extrinsisch, wie z.B. thermische Inkompatibilität zwischen Bauteil und Werkzeug, dem Aushärteprozess und Reibung bzw. Formschluss zwischen Bauteil und Werkzeug sind [13] [14] [15].

Die Eigenspannungen resultieren in drei wesentlichen Effekten:

- Spring-In
- Warpage
- Forced Interaction

Diese Effekte sollen im Folgenden genauer erläutert werden.

2.2.1 Spring-In-Effekt

Spring-In bedeutet in der Faserverbundherstellung, dass Winkel, die auf dem Formwerkzeug z.B. einen 90° Winkel abbilden, in der fertigen Bauteilgeometrie einfallen (englisch „to spring in“) und einen kleineren Winkel von beispielsweise 88° abbilden (Abbildung 2).

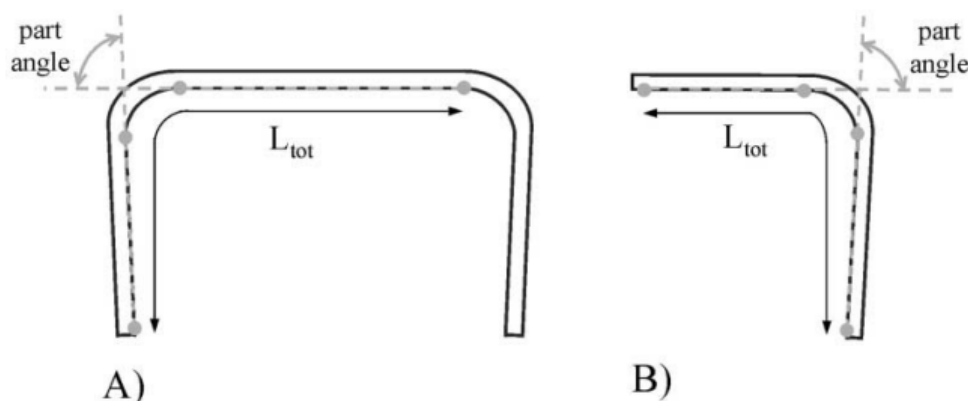


Abbildung 2 Schematische Darstellung des Spring-In-Effekts [13]

Abweichungen dieser Art führen in Montageprozessen zu Problemen, da Anschlussstellen nicht mehr übereinstimmen und Spalte auftreten, die überbrückt werden müssen, was dann wieder zu Einbußen in der Tragfähigkeit der Bauteile führt. Daher werden heutzutage

verschiedene Ansätze verfolgt, um den Spring-In-Effekt bestmöglich voraussagen zu können. Durch die genaue Vorhersage können Werkzeuge dann bereits vorher so modifiziert werden, dass die fertigen Bauteile die gewünschten Winkel abbilden.

Ein häufig verwendeter Ansatz zur groben Berechnung des Einfalls ist der analytische Ansatz nach Radford [14] [15], der durch folgende Formel beschrieben wird:

$$\Delta\varphi = \tilde{\varphi} \frac{\varepsilon_T - \varepsilon_R}{1 + \varepsilon_R} = \tilde{\varphi} \left[\frac{(\alpha_T - \alpha_R)\Delta T}{(1 + \alpha_R\Delta T)} + \frac{(\beta_T - \beta_R)}{(1 + \beta_R)} + \dots \right] \quad (1)$$

Die Formel berücksichtigt Verzüge in tangentialer und radialer Richtung, wie in Abbildung 3 gezeigt.

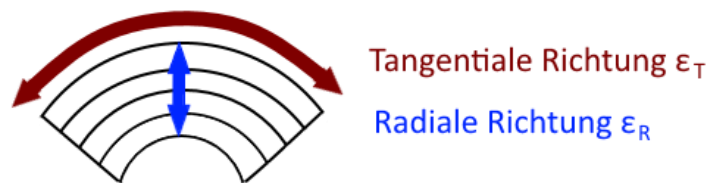


Abbildung 3 Betrachtete Richtungen in der analytischen Methode nach Radford [15]

Die Dehnungen in diesen Dimensionen können in reversible Anteile, wie z.B. den thermoelastischen Anteil oder Änderungen durch Wasseraufnahme, sowie in irreversible Anteile, wie den chemischen Schwund des Harzes, unterteilt werden [15]. In dieser Arbeit wird sich auf den reversiblen thermischen Anteil (α_T und α_R) und den irreversiblen chemischen Anteil (β_T und β_R) bezogen.

Vorteile der Berechnung nach Radford gegenüber FEM Berechnungen sind zum einen die einfache Durchführung und zum anderen werden nur wenige Materialdaten benötigt. Natürlich stellt diese Methode durch die Berücksichtigung weniger Parameter nur eine grobe Abschätzung dar, reicht in erster Instanz jedoch aus, um den Einfluss des Spring-Ins zu beurteilen. Im Laufe dieser Arbeit wird die analytische Methode nach Radford zur Rate gezogen.

2.2.2 Warpage

Der zweite Effekt ist Warpage. Warpage ist als Krümmung und Verdrehung ursprünglich flacher Bauteile bzw. ursprünglich flacher Bauteilabschnitte definiert [16]. Diese Verformung wird hauptsächlich durch eine ungleiche Spannungsverteilung in Bauteildickenrichtung erzeugt, die wiederum durch unterschiedliche Dehnungen von Bauteil und Werkzeug verursacht wird [16].

In Abbildung 4 ist zu erkennen, dass das Formwerkzeug sich während der Aufheizphase weiter dehnt als das CFK-Bauteil. Durch das Abgleiten der einzelnen CFK-Lagen untereinander stellt sich nun ein ungleichmäßiger Spannungszustand über die Dicke des Bauteils ein. In diesem Spannungszustand findet dann die Aushärtung der Matrix statt, wodurch es nach dem Abkühlen zur Krümmung des Bauteils kommt.

Je dünner die gefertigten Lamine sind, desto stärker tritt dieser Effekt auf.

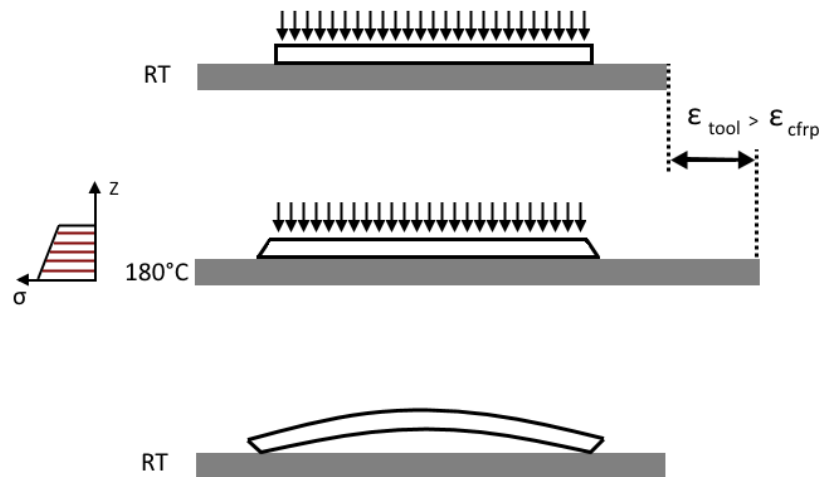


Abbildung 4 Schematische Darstellung der Entstehung des Warpage-Effekts nach [15]

Außerdem ist dieser extrinsische Effekt nur bei einteiligen Werkzeugen zu beobachten, da die Interaktion von Bauteil und Werkzeug ansonsten auf beiden Bauteilseiten gleichermaßen auftritt.

Des Weiteren kann der Warpage-Effekt durch den Einsatz von Werkzeugmaterialien mit einem dem Laminat ähnlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten, wie Invar, CFK oder GFK, minimiert werden, wodurch jedoch erhöhte Werkzeugfertigungskosten anfallen können.

Bei bestimmten Geometrien wie einem C-Profil kommt es zu einer Überlagerung der beiden genannten Effekte, wodurch sich die in Abbildung 5 zusehende Deformation einstellt.

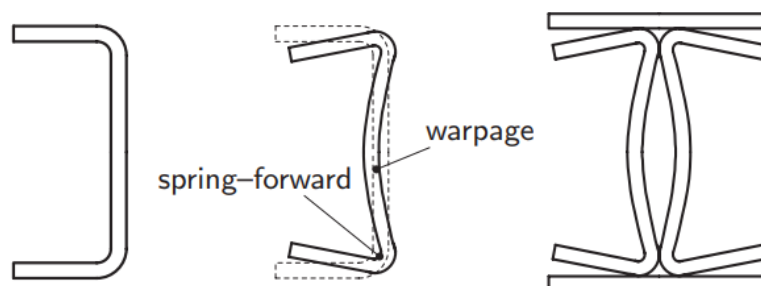


Abbildung 5 Überlagerung von Spring-In und Warpage [16]

Auch hier durch entstehen wieder Performanceeinbußen und erhöhte Kosten durch Nacharbeiten bzw. erhöhten Montageaufwand.

2.2.3 Forced Interaction

Forced Interaction ist auch ein Effekt, der auf den unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Werkzeug und Bauteil beruht. Der Autoklavdruck zwingt das Laminat auf der Werkzeugoberfläche zu bleiben, während das Werkzeug sich ausdehnt. Weiteres Rutschen wird zusätzlich durch einen Formschluss verhindert (siehe Abbildung 6), wodurch Normalspannungen parallel zur Faserrichtung in das Bauteil eingebracht werden. Dieser Effekt tritt im Vergleich zu Warpage auch bei dickeren Laminaten ($>3 \text{ mm}$) auf [14].

Je nach Geometrie ist eine genaue Voraussage über die Anteile der einzelnen Effekte nicht möglich, da es oft zu starken Überlagerungen der Effekte kommt. Sicher ist aber, dass die

Auswahl des Werkzeugmaterials und die Anpassung der Geometrie die drei Effekte beeinflussen können.

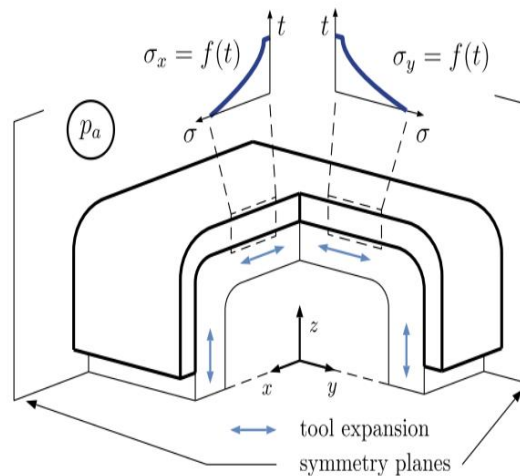


Abbildung 6 Spannungszustand hervorgerufen durch die räumliche Ausdehnung des Werkzeugs im Forced Interaction Effekt [14]

2.2.4 Bi-Metall-Effekt

Die Theorie des Bi-Metall-Effekts wurde 1925 von Timoshenko beschrieben und erklärt, wie sich zwei miteinander verbundene Metalle mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten bei gleichmäßiger Erwärmung verhalten.

Durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten und den damit verbundenen unterschiedlichen Dehnungen wird sich der Metallverbund, wie in Abbildung 7 gezeigt biegen.

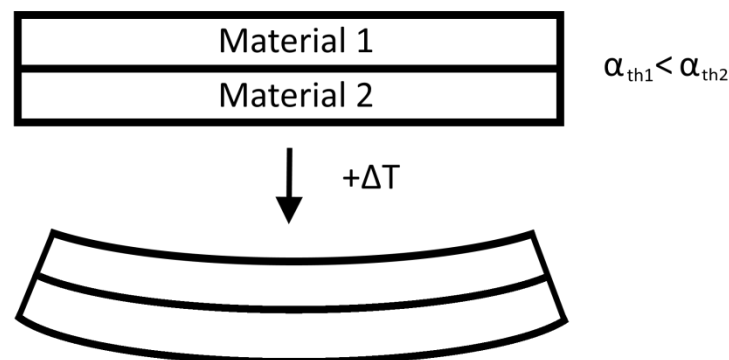


Abbildung 7 Verformung ausgelöst durch den Bi-Metall-Effekt nach [17]

Der Effekt tritt natürlich auch auf, wenn eines der beiden Metalle durch einen anderen Werkstoff wie einen faserverstärkten Kunststoff ersetzt wird.

In diesem Fall werden die auftretenden Spannungen ab dem Zeitpunkt der Anbindung in dem Bauteil eingelagert, wodurch bei dem fertigen Bauteil auf Raumtemperatur wieder Abweichungen von der ursprünglich angestrebten Geometrie auftreten.

Wenn man nun ein symmetrisches Laminat aufbaut, sodass die Dehnungen auf beiden Seiten identisch sind, verformt sich das Bauteil zwar nicht wie im Bi-Metall-Effekt gezeigt, es werden trotzdem Eigenspannungen in das Bauteil eingebracht.

Wie oben bereits erwähnt, dehnen sich die beiden Werkstoffe in einem Verbund ab dem Zeitpunkt der Anbindung gemeinsam. Dies ist in Abbildung 8 am Beispiel von GLARE gezeigt. Nach dem Abkühlen treten in den Faserlagen Druckspannungen auf, während in den Metalllagen Zugspannungen auftreten, was wiederum zu Deformationen bzw. kritischen Spannungen an den Interfaces führen kann.

All diese Faktoren müssen bei der Auslegung von FML-Laminaten berücksichtigt werden, können aber auch genutzt werden, um Funktionen zu integrieren, bzw. gewollte Deformationen in Betrieb hervorzurufen.

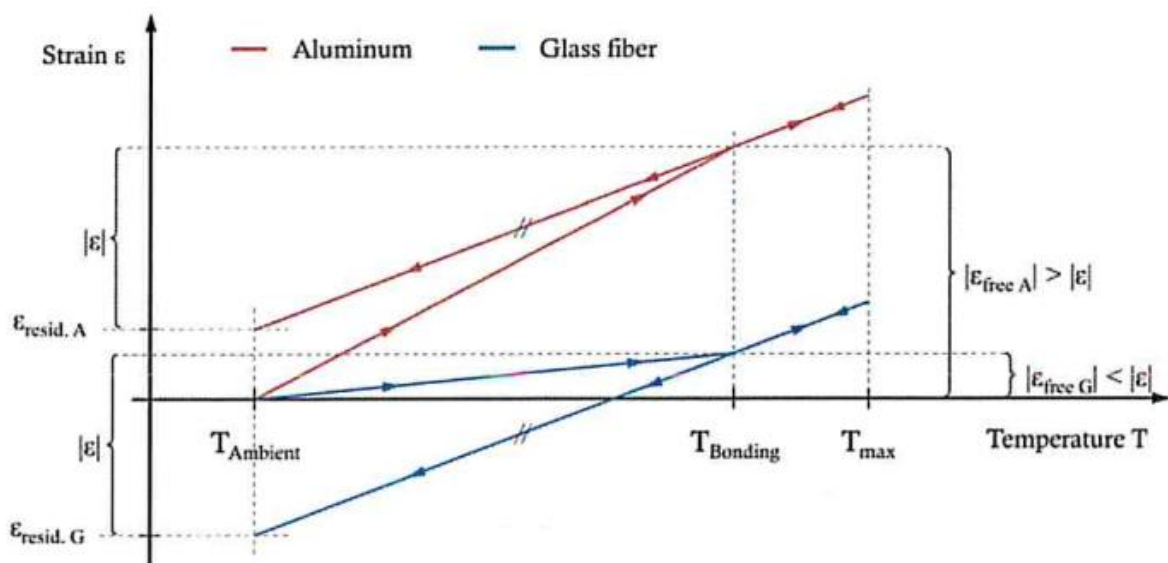


Abbildung 8 Eigenspannungen in GLARE [15]

2.3 Metallumformung

Im folgenden Kapitel sollen die theoretischen Grundlagen der Metallumformung genauer erläutert werden.

2.3.1 Grundlagen der Metallumformung

Nach DIN 8580 versteht man unter Umformen das Überführen einer gegebenen Roh- oder Werkstückform in „eine bestimmte Zwischen- oder Fertigform“ [18]. Stoffzusammenhalt und die Masse bleiben dabei unverändert.

Die verschiedenen Verfahren werden nach DIN 8582 eingeteilt, in dem man die Spannung in der Umformzone betrachtet. Daraus ergeben sich vier Hauptgruppen, nämlich Druck-, Zugdruck-, Biege- und Schubumformung. Eine andere Möglichkeit ist die Unterteilung in Blech- und Massivumformung [19].

Außerdem wird unterschieden, ob es sich um Warm- oder Kaltumformen handelt, sprich ob das Werkstück vor dem Umformen erwärmt wird oder nicht.

Da für die Herstellung von FML-Laminaten dünne Metallfolien bzw. Bleche in den Verbund eingelegt werden, wird der Fokus in diesem Kapitel auf die Blechumformung gelegt.

Ein wichtiger Punkt in Bezug auf Umformen ist Fließen, da erst dann eine plastische Verformung auftritt. „Fließen eines Werkstoffs ist gegeben, wenn durch einen bestimmten Spannungszustand eine bleibende Formänderung erzielt wird“ [19].

Der zweite Punkt ist, dass beim Umformvorgang das Volumen des umgeformten Körpers annähernd konstant bleibt [18].

$$V = l_0 * b_0 * h_0 = l_1 * b_1 * h_1 = konst. \quad (2)$$

Die damit einhergehenden Formänderungen kann man absolut beschreiben ($\Delta h = h_1 - h_0$), bezogen auf die Ausgangslänge ($\varepsilon_h = \frac{h_1 - h_0}{h_0}$ = Dehnung), als Formänderungsverhältnis ($\gamma = \frac{h_1}{h_0}$) oder als Umformgrad ($\varphi_h = \ln \frac{h_1}{h_0}$) [19].

Über die Volumenkonstanz kann man für einen Körper der Abmaße $l*b*h$ sagen, dass die Umformgrade addiert gleich null ergeben müssen:

$$\varphi_l + \varphi_b + \varphi_h = 0 \quad (3)$$

(wahlweise $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$)

Das Fließen eines Metallwerkstoffs geht immer mit Gleiten der Gitterebenen einher. Durch den kristallinen Aufbau der Metallwerkstoffe lässt sich bis zur Fließgrenze ein proportionales Verhalten zum Spannungs-Dehnungs-Diagramm nachweisen. Gitterdehnung und Gitterstauchung führen zu einer elastischen Verformung, ab dem Fließbeginn kommt es zum Abgleiten [18].

Bei perfekt homogenen Werkstoffen entsprechen die bevorzugten Gleitebenen den maximalen Zugspannungen. Durch Gitterfehler ist der Fließbeginn jedoch schon bei niedrigeren Schubspannungen festzustellen.

Ob genügend Spannung im Werkstoff vorhanden ist, damit es zum Fließen kommt, kann durch verschiedene Hypothesen beschrieben werden.

Bei der Metallumformung gibt es zwei sehr häufig angewendete Hypothesen, die Schubspannungshypothese nach Tresca und die Gestaltänderungshypothese nach von Mises [19]. Mit Hilfe dieser Hypothesen kann eine Vergleichsspannung errechnet werden, mit der man dann eine Aussage treffen kann, ob sich ein Material plastisch verformt oder nicht.

In Bezug auf den Morschen Spannungskreis kann folgende Fließbedingung formuliert werden:

$$\sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\tau_{max} = \sigma_v \quad (4)$$

mit σ_{max} = größte positive Hauptnormalspannung

σ_{min} = größte negative Hauptnormalspannung

τ_{max} = größte Schubspannung

σ_v = Vergleichsspannung

Nach Tresca tritt also dann Fließen auf, „wenn die größte Schubspannung τ_{\max} die Schubfließspannung k eines Werkstoffs erreicht“ [19]. Daraus folgt:

$$\tau_{\max} = k \quad (5)$$

Für den einachsigen Spannungszustand ergibt sich dann:

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 = \frac{F}{A} = k_f \quad (6)$$

Woraus dann $k_f = \sigma_v$ folgt.

Die logarithmische Vergleichsformänderung ist in diesem Fall $\varphi_v = \varphi_g = \{|\varphi_1|; |\varphi_2|; |\varphi_3|\}_{\max}$

Nach von Mises tritt dann Fließen ein, wenn die elastische Gestaltänderungsenergie einen kritischen Wert erreicht.

$$k_f = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (7)$$

Verrechnet mit der mittleren Spannung ergibt sich dann für reine Schubspannung

$$k_f = \sqrt{3}\tau_{\max} , \quad (8)$$

wodurch sich für die Vergleichsformänderung

$$\varphi_V = \sqrt{\frac{2}{3}(\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_3^2)} \quad (9)$$

ergibt.

Je nach Belastung und den daraus resultierenden einachsigen oder mehrachsigen Spannungszuständen, sind unterschiedliche Formänderungen möglich.

Abbildung 9 zeigt Mohrsche Spannungskreise mit den dazugehörigen Belastungen und dem daraus resultierenden Formänderungsvermögen. „Der Abstand von τ_F und τ_B ist dabei ein jeweiliges Vergleichsmaß für das plastische Verformungsvermögen“ [18].

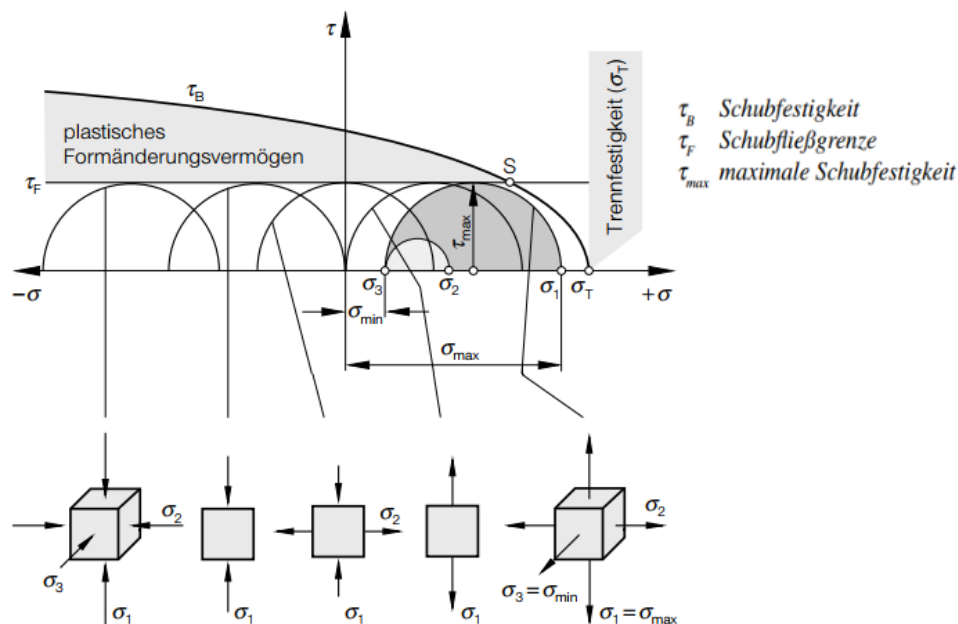


Abbildung 9 Mohrsche Spannungskreise mit dazugehörigen Spannungszuständen [18]

In der Abbildung ist außerdem zu erkennen, dass unter mehrachsigen Druckspannungszuständen ein höheres plastisches Formänderungsvermögen vorhanden ist. Im klassischen Zugversuch wird die Probe um eine bestimmte Länge gedehnt, bis es zum Einschnüren der Probe und dem anschließenden Bruch kommt. Das Abknicken der Kurve am Ende vor dem Bruch ist darauf zurückzuführen, dass die Spannung auf den Ausgangsquerschnitt S_0 bezogen wird. Die wirklich wirkende Spannung k_f wird auf den wirklichen Querschnitt bezogen [18].

$$k_f = \frac{F}{S_1} \quad (10)$$

Trägt man diese Spannung nun über den Vergleichsumformgrad auf, erhält man die sogenannte Fließkurve (siehe Abbildung 10).

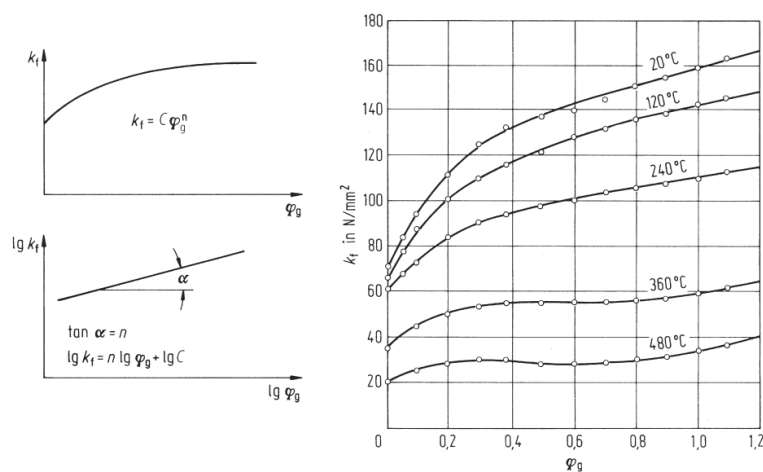


Abbildung 10 allg. & temperaturabhängige Fließkurven [19]

Die Fließspannung in ihrer vollen Definition ist eine Funktion der logarithmischen Hauptformänderung φ , der logarithmischen Hauptformänderungsgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ und der Temperatur des Umformguts [19]. Für die meisten metallischen Werkstoffe kann der Verlauf der Fließkurve jedoch durch die Formel angenähert werden, unter der Voraussetzung, dass man weit unter der Rekristallisationstemperatur umformt.

$$k_f = C * \varphi_g^n \quad (11)$$

$$\text{mit } k_f \geq R_{P0,2} \quad [19]$$

Die Variable n beschreibt den Verfestigungsexponenten. Hohe n -Werte zeigen an, dass der Werkstoff mit zunehmender Formänderung eine starke Verfestigung aufweist [19].

Über die Fließkurven eines Materials können dann die Fließspannungen und damit die Kräfte ermittelt werden, die zum plastischen Verformen des Werkstücks benötigt werden.

Da die Blechumformung hauptsächlich kalt erfolgt, reicht die Näherung der Formel für die meisten Anwendungsfälle aus. Abbildung 10 zeigt exemplarisch noch einmal, wie sich k_f bei unterschiedlichen Temperaturen verhält.

Bei der Metallumformung ist zu beachten, dass eine gewisse Rückstellkraft des Metalls vorhanden ist, die aus dem elastischen Anteil der Umformung resultiert.

2.4 Fertigungsverfahren – Blechumformung

In diesem Kapitel sollen die vier gängigsten Verfahren zur Blechumformung genauer beschrieben und ihre typischen Einsatzbereiche aufgezeigt werden.

2.4.1 Streckziehen

Nach VDI 3140 ist das Streckziehen für das Herstellen großer flacher Bauteile gedacht, wobei das Streckziehen in einfaches Streckziehen und Tangentialstreckziehen unterteilt wird.

Beim einfachen Streckziehen wird das Blech zweiseitig bei einfach gekrümmten Bauteilen oder vierseitig bei mehrfachgekrümmten Strukturen eingespannt, wie in Abbildung 11 zu sehen ist. Anschließend wird ein Stempel vertikal in das Blech hineingefahren und erzeugt so die angestrebte Kontur. Reibung zwischen Stempel und Blech führt zu einer ungleichmäßigen Dehnung im Bauteil [19].

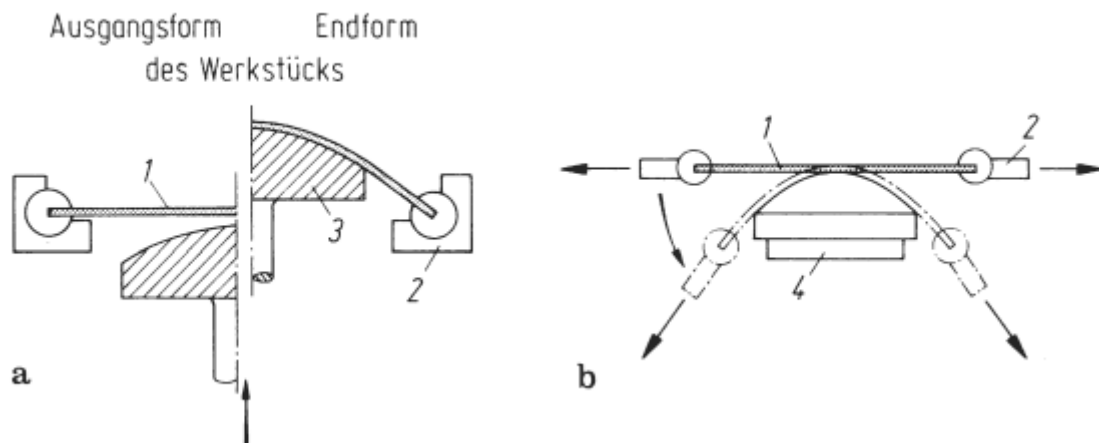


Abbildung 11 Schematische Darstellung des a) einfachen Streckziehens b) Tangentialstreckziehens [19]

Eine gleichmäßigere Verteilung der Dehnung kann durch das Tangentialstreckziehen erzielt werden. Dabei wird das Blech ebenfalls zweiseitig eingespannt und anschließend bis an die Fließgrenze gezogen. In diesem Zustand wird das Blech dann an den Stempel angelegt. Durch eine geeignete Werkstoffwahl kann die Abformung der Soll-Geometrie verbessert werden. So sollte der Blechwerkstoff einen möglichst hohen Verfestigungsexponenten aufweisen, um die Formänderung möglichst gleichmäßig über das Bauteil zu verteilen. Außerdem sollte die Reibung zwischen Werkzeug und Blech so gering wie möglich sein, um ein gleichmäßiges Anlegen des Werkstoffs an den Stempel zu gewährleisten [19].

Bei diesen Verfahren ist zu beobachten, dass sich die Blechdicke während des Umformprozesses ändert.

2.4.2 Tiefziehen

In der Massenproduktion von Blechteilen spielt Tiefziehen eine zentrale Rolle, da komplexe Geometrien in hohen Stückzahlen hergestellt werden können. So findet dieses Verfahren

beispielsweise Anwendung in der Automobilindustrie für Karosserieteile, in der Herstellung von Haushaltsgeräten oder einfach Gebrauchsgegenständen.

Nach DIN 8584-1 ist „Tiefziehen [...] Zugdruckumformen eines Blechzuschnitts – je nach Werkstoff auch einer Folie oder einer Platte, eines Ausschnitts oder Abschnitts - zu einem Hohlkörper ohne beabsichtige Veränderung der Blechdicke“ [18].

Anders als beim Streckziehen wird das Blech seitlich nicht fest eingespannt, so dass es während des Umformvorgangs nachrutschen kann und so Oberfläche und Blechdicke annähernd konstant gehalten werden [19].

Damit es beim Ausformen beispielsweise eines Zylinders nicht zu Faltenbildung am oberen Kragenrand kommt, wird das Blech außen mit einem Niederhalter fixiert, der mit einer definierten Kraft auf das Blech drückt, so dass es aber noch rutschen kann.

Tiefziehen wird generell in Tiefziehen im Erstzug und Tiefziehen im Weiterzug unterteilt. Während beim Tiefziehen im Erstzug ein Stempel und ein Niederhalter in einem Schritt die gewünschte Form ohne Verjüngung o.Ä. erzeugt, kommen, wie in Abbildung 12 zu sehen, beim Tiefziehen im Weiterzug mehrere Niederhalter bzw. Stützringe zum Einsatz, so dass komplexere Geometrien erzeugt werden können.

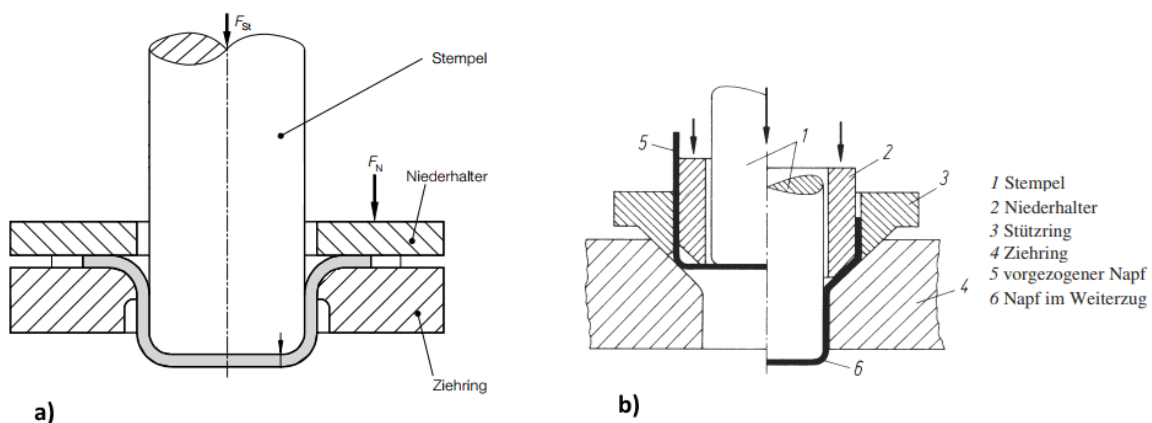


Abbildung 12 a) Tiefziehen im Erstzug b) Tiefziehen im Weiterzug [18] [19]

Für das Ziehen unsymmetrischer Teile kann auch eine Mischung aus Streckziehen und Tiefziehen verwendet werden. Dies findet häufig im Karosseriebau Anwendung, da die dort geforderten Formen sehr hohe Komplexitäten aufweisen.

Werkstoffseitig sollten n -Wert und r_{\min}^2 möglichst groß sein. Die Reibung zwischen Blech und Stempel sollte ebenfalls groß sein während die Reibung zwischen Niederhalter und Blech einen möglichst kleinen Wert aufweisen sollte [19].

2.4.3 Biegen

Nach Din 8586 ist Biegen „das Umformen eines festen Körpers, wobei man den plastischen Zustand im Wesentlichen durch eine Biegebeanspruchung herbeiführt“ [18]. Biegen gehört zu den gebräuchlichsten Verfahren in der Umformtechnik und findet auch in weiten Teilen

² r_{\min} : senkrechte Anisotropie = dimensionsloses Maß für die Anisotropie plastischer Verformung

der Industrie Anwendung, da es sowohl großserientauglich ist als auch für die Fertigung von Einzelteilen.

Eine wichtige Erscheinung beim Biegen ist die elastische Rückfederung nach Entlastung des Werkstücks, so dass Biegewinkel kleiner und Biegeradien größer sind als unter der aufgetragenen Last. Wichtig hierbei ist die Beachtung der Werkstoffkennwerte wie E-Modul und $R_{p0,2}$. Als Lösung hierfür werden die Werkstücke häufig überbogen bzw. im Gesenk nochmals nachgedrückt [19]. Es muss auch darauf geachtet werden, dass für den Werkstoff zulässige Biegeradien nicht unterschritten werden, da sonst Risse auf der Zugseite des Blechs auftreten können. Der Mindestbiegeradius kann nach DIN 6935 berechnet werden [18].

Das Biegen kann in mehrere Verfahren unterteilt werden.

Zum einen gibt es das freie Biegen mit Dreipunktauflage oder freies Biegen mit einem einseitig eingespannten Blech, an dem ein Stempel am freien angreift. Diese Methoden bilden die Grundlagen für alle weiteren Verfahren und werden sowohl maschinell als auch von Hand umgesetzt.

So ist beim Gesenkbiegen im V-Gesenk (Abbildung 13 a) der Weg bis beide Schenkel am Werkzeug anliegen freies Biegen und anschließend wird das Blech im Nachdruck noch überbogen. Das Biegen im Gesenk gibt es auch als Variante im U-Gesenke, bei denen sich zwei Schenkel nach dem Umformen wie in Abbildung 13 b) parallel durch einen Steg verbunden gegenüberstehen [19].

Beim sog. Rundbiegen oder Walzrunden zum Erzeugen größerer Radien gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen kann ein Klemmbolzen das Blech auf die Biegerolle spannen, so dass das Blech geführt immer noch nachrutschen kann, zum anderen kann das Umformen wie in Abbildung 14 über drei bis vier Walzen erfolgen.

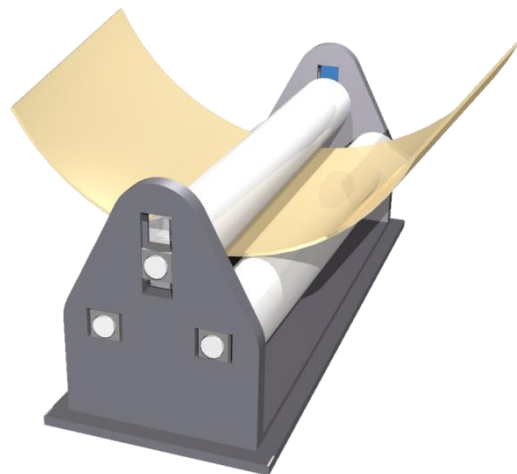
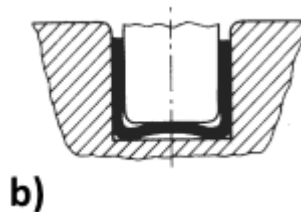
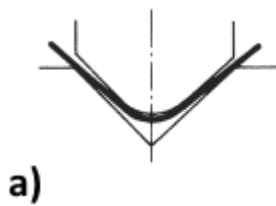


Abbildung 13 Schematische Darstellung von Biegen im a) V-Gesenk b) U-Gesenk [19]

Abbildung 14 Schematische Darstellung des des Rundbiegens / Walzrundens [20]

Mit Hilfe des Biegens können auch Falze hergestellt werden, so dass zwei Bleche per Formschluss miteinander verbunden sind.

2.4.4 Inkrementelle Blechumformung

Wie der Name impliziert, findet die inkrementelle Blechumformung schrittweise statt. Klassischerweise formt ein Drückdorn die gewollte Kontur ab, in dem er eine vorgegebene Bahn abfährt, wie in Abbildung 15 zu sehen ist [21].

Dieses Verfahren weist durch ein sehr kleines Verhältnis von Umformzone zu Bauteilvolumen einen sehr hohen Umformgrad auf. Außerdem können sehr günstige Werkzeuge eingesetzt werden, da die Kontur hauptsächlich durch den Dorn erzeugt wird und das Blech sich nur an das untere Werkzeug anlegt. Wahlweise kann auch ein in sich elastisches Kissen benutzt werden. Dadurch ist das Verfahren gerade für die Kleinserie sehr interessant [21].

Eine Sonderform der inkrementellen Blechumformung stellt das inkrementelle Kanten dar. Grundprinzip ist hierbei, dass man Bleche z.B. mit einem Radius versieht, in dem man viele kleine Radien auf mikroskopischer Ebene einbringt, so dass makroskopisch ein größerer Radius entsteht. Dadurch können auch hochkomplexe Profilgeometrien realisiert werden, die z.B. beim Rundbiegen nicht hergestellt werden können oder aufgrund von Materialeigenschaften nicht geformt werden können [22].

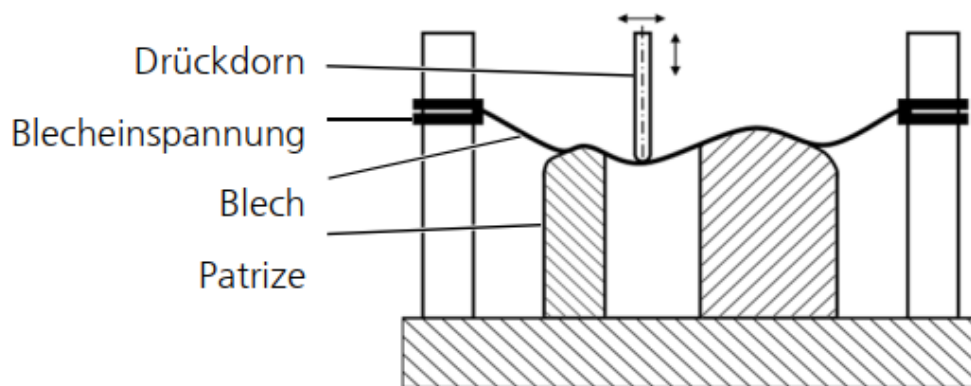


Abbildung 15 inkrementelle Blechumformung [21]

3 Probenfertigung

Der erste Schritt in der Faserverbundfertigung ist die Herstellung der Preforms. Im Zuge dieser Arbeit sollen verschiedene Konzepte erarbeitet werden, wie aus den CFK-Lagen und den Stahlfolien Preforms erstellt werden können und es soll überprüft werden, ob die Art und Weise des Vorformens einen Einfluss auf die Endgeometrie hat.

Im Folgenden werden der grundlegende Fertigungsablauf, die verschiedenen Konzepte zur Preform-Herstellung, die Gedanken hinter den verwendeten Lagenaufbauten, sowie die praktische Herstellung der Bauteile genauer beschrieben.

3.1 Grundlegender Fertigungsablauf

Die verschiedenen Konzepte sollen an Probekörpern in Omega-Form untersucht werden, welche in einem Heißpressverfahren in einem zweiteiligen Werkzeug hergestellt werden. Diese Auswahl wurde getroffen, da die Omega-Form verschieden große Radien besitzt, an denen unterschiedliche Effekte gezeigt werden können. Das dazugehörige zweiteilige Werkzeug wurde bereits für vorangegangene Tests verwendet und der Prozess ist bereits für ein Kohlenstofffaser-Prepreg erprobt. Aus diesem Grund werden für die nachfolgende Testreihe die gleichen Materialien verwendet, da diese nachweislich für diesen Prozess geeignet sind.

Das verwendete Kohlenstofffaser-Prepreg-System ist HexPly 8552 mit AS4-Faser der Firma Hexcel (Datenblatt siehe Anhang A), welches häufig für Luftfahrtanwendungen verwendet wird und einen guten Impactwiderstand, sowie eine gute Schadenstoleranz aufweist. Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die Materialeigenschaften.

Tabelle 1 Materialkennwerte des UD-Prepreg 8552/AS4

Halbzeug	UD-Tape
Fasertyp	AS4 (HT)
Matrix	8552 Epoxidharz
Nominaler Faservolumengehalt	57,42%
0° E-Modul	134 GPa
Nominale Dicke (ausgehärtet)	0,13 mm
Dichte (Laminat)	1,58 g/cm³

Die verwendeten Stahlfolien sind aus der Legierung 1.4310, einem sogenannten Federstahl. Ursprünglich wurde diese Legierung ausgewählt, da sie hochfest und gleichzeitig hochlegiert ist, mit dem Ziel einer möglichst guten Korrosionsbeständigkeit (siehe Tabelle 2). Außerdem weisen Federstähle eine sehr große Dehngrenze auf, wodurch sie hohe Verformungen ertragen können und nach dem Entfernen der Last wieder in ihre Ursprungsform zurückgehen. Während austenitische Stähle ein $R_{p0,2}$ zwischen 200 und 300 N/mm² und martensitische teilweise Werte bis 800 N/mm² liegen Federstähle in der Regel bei einem $R_{p0,2}$ zwischen 1150 und 1400 N/mm².

Tabelle 2 Materialkennwerte der verwendeten Stahllegierung 1.4310

Legierungszusammensetzung	X10CrNi18-8
Werkstoffnummer	1.4310
Steifigkeit	179 GPa
Festigkeit	1300 MPa
Dichte	7,9 g/cm³
Foliendicke	0,25 mm

Der erste Schritt der Herstellung ist das Zuschneiden der Prepreg-Lagen am Cutter auf Maß. Um einen funktionierenden stabilen Verbund aus dem FVK und den Stahlfolien herstellen zu können, müssen die Stahlfolien je nach Anforderung chemisch, elektrochemisch bzw. mechanisch vorbehandelt werden [5]. Durch diese Vorbehandlung wird die Oxidschicht auf der Oberfläche der Folie entfernt. Um diesen Zustand zu konservieren und die Anbindung zu gewährleisten wird die Folie anschließend in ein Sol-Gel-Bad getaucht und eine Schicht ausgebildet. Im Anschluss werden die Folien mit dem Prepreg zu einem Stack verarbeitet und falls notwendig in die gewünschte Form gebracht. Abschließend wird das Bauteil in einer Presse oder einem Autoklav nach einem vorgegebenen Zyklus ausgehärtet. Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Kapiteln noch genauer erläutert.

3.2 Konzepterarbeitung zur Preform-Herstellung

Das Erstellen der Preforms kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Die verschiedenen Konzepte, die im Laufe dieser Arbeit erarbeitet und überprüft werden sollen, werden im nachfolgenden Kapitel genauer erläutert.

3.2.1 Vorformen durch ein Vakuumdiaphragma

Als erstes Konzept wird der sogenannte Hotforming-Prozess betrachtet, der am Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (folgend als DLR bezeichnet) bereits verwendet wird, um Faser-Metall-Laminat-Preforms in die entsprechende Form zu bringen. Dabei werden sowohl die Stahlfolien als auch die Prepreg-Lagen zu einem ebenen Laminat abgelegt, welches anschließend in einem Ofen erwärmt wird, um die Viskosität des Harzes zu erhöhen. Die Temperatur hängt hierbei vom verwendeten Harzsystem ab, da die Temperatur zur Erhöhung der Viskosität unter der Vernetzungstemperatur des Harzes liegen muss. Anschließend wird das Laminat mittig auf dem Werkzeug platziert und eine dehnbare Membran, ein sogenanntes Diaphragma, über das Laminat und das Werkzeug gelegt. Zum Umformen wird das Diaphragma mit Vakuum beaufschlagt. Hierdurch legt sich die Membran erst an das erwärmte Laminat und zieht dieses in die Werkzeugform [23]. Hierbei ist darauf zu achten, dass nicht nur das Laminat, sondern auch das Werkzeug auf Temperatur gebracht werden muss, damit das Laminat beim Auflegen auf das Werkzeug nicht abrupt an Temperatur verliert.

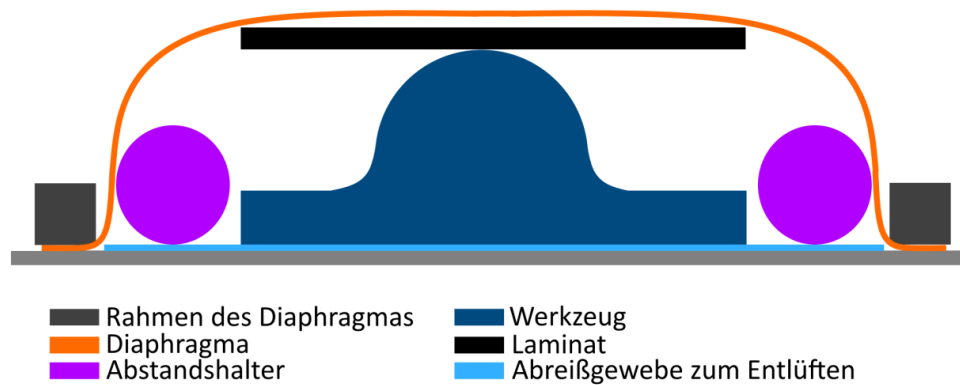


Abbildung 16 Schematische Darstellung des Diaphragma-Aufbaus zum Vorformen der Lamine

Wie in Abbildung 16 dargestellt, werden neben dem Aufbau noch zwei Kunststoffrollen platziert, damit sich die Membran beim Anlegen des Vakuums nicht unter das Laminat zieht. Dies ist auch der Grund, warum in diesem speziellen Anwendungsfall die Stempelseite des Werkzeugs für das Vorformen genutzt wird, da das Herunterziehen der Membran unter das Laminat hier einfacher verhindert werden kann.

Nach dem das Laminat umgeformt ist, wird das Diaphragma entfernt und die zweite Werkzeugformhälfte kann aufgelegt und alle nötigen Hilfsstoffe für den Pressgang können eingebracht werden (siehe Kapitel 3.5.2). Unter dem Werkzeug und den Kunststoffrollen ist außerdem Abreißgewebe platziert, sodass der gesamte Aufbau vollständig evakuiert werden kann.

Ein Problem dieses Prozesses könnte sich daraus ergeben, dass die Rückstellkraft der Metallfolien das Material wieder aus der Form bringt und das Laminat nicht ausreichend umformt, um ein vollständiges Schließen und Abdichten des Werkzeugs zu gewährleisten.

3.2.2 Vorformen durch das Eigengewicht des Werkzeugs

In diesem Konzept soll überprüft werden, ob das Eigengewicht des Werkzeugs ausreicht, um das FML in die gewünschte Form zu bringen. Hierbei fällt der Schritt des Umformens über das Diaphragma weg, sodass Zeit eingespart und der Fertigungsaufwand minimiert werden könnten.

Bei dieser Variante werden die Lagen ebenfalls eben abgelegt und der gesamte Stack aufgebaut. Um auch hier eine bessere Umformbarkeit zu erzielen und das Harz viskoser zu machen, wird das Lagenpaket vor dem Umformen erwärmt. Danach wird der Stack mittig auf der unteren Werkzeughälfte platziert und das Werkzeug geschlossen. Hierbei muss gewährleistet werden, dass die beiden Werkzeughälften mittig zusammengeführt werden, da sich das Laminat sonst schräg auf das Werkzeug legt (siehe Kapitel 3.5.1).

Die Lage der Metallfolien kann bei diesem Umformverfahren eine entscheidende Rolle spielen. Das Laminat hat an drei Stellen Berührungspunkte mit dem Werkzeug (Siehe Abbildung 17). An der Unterseite des Werkzeugs muss gewährleistet werden, dass das Laminat ausreichend gut abgleiten kann, um während des Umformprozesses nicht

beschädigt zu werden. Das Metall weist im Vergleich zum leicht klebrigen CFK einen geringeren Reibungskoeffizienten auf und erleichtert somit das abgleiten.

Ist das deutlich besser haftende CFK an der Stempelseite des Werkzeugs platziert, könnte dies den Vorteil haben, dass das Lagenpaket sich langsam an den Stempel anlegt und das Laminat beim weiteren Schließen und Handhaben des Werkzeugs nicht verrutscht.

Bei diesem Verfahren könnte es zu Faltenbildung während des Umformprozesses kommen, da das Laminat nicht gleichmäßig über die gesamte Fläche wie beim Diaphragma mit einer Kraft beaufschlagt wird. Dies könnte an den meistbelasteten Stellen dazu führen, dass das CFK während des Umformens Falten wirft.

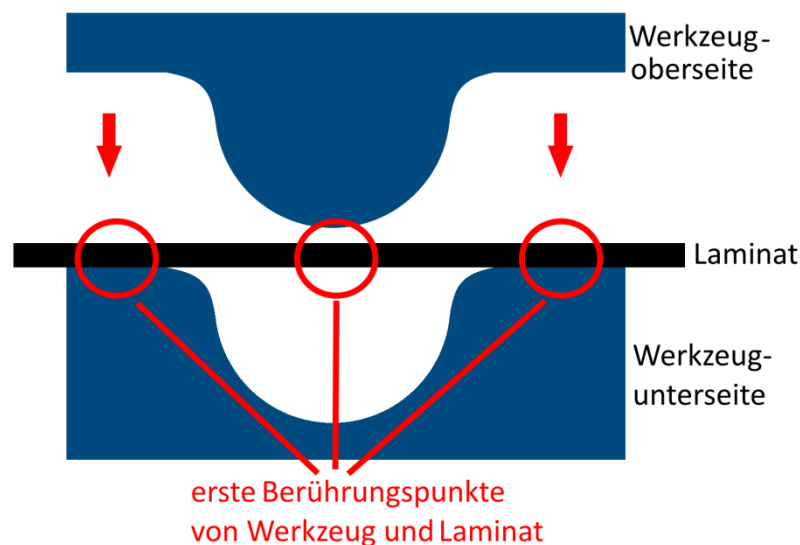


Abbildung 17 Schematische Darstellung des Umformens der Laminare durch Eigengewicht des Werkzeugs

3.2.3 Einlegen vorgeformter Folien

Im dritten Konzept werden die Folien vor dem Einlegen in das Laminat schon in die Omega-Form gebracht. Hierbei soll untersucht werden, ob durch das Vorformen weniger Eigenspannungen in das fertige Bauteil eingebracht werden, da die Rückstellkraft theoretisch geringer sein müsste.

In diesem Konzept ändert sich der Ablauf der Fertigung, da die Folien vor der Oberflächenvorbehandlung schon umgeformt werden müssen und diese nicht direkt in das ebene Laminat eingebracht werden können. Der Umformprozess und die Vorbehandlung der Metallfolien werden in Kapitel 3.4 genauer beschrieben. Der CFK-Anteil des Laminats muss genau wie die Metallfolien die Omega-Form besitzen, bevor diese zu einem Stack aufgebaut werden können. Hierzu wird der Hotforming-Prozess genutzt.

Bei diesem Konzept könnte das Umformen der Metallfolien eine Herausforderung darstellen, da es sich zum einen um Federstahl handelt und die niedrige Materialstärke die Mindestdicke bestimmter Maschinen zum Umformen unterschreiten könnte. Außerdem könnten Abweichungen in der Geometrie der Folien zu Abweichungen in der Endkontur führen.

3.3 Auswahl geeigneter Lagenaufbauten

Um auftretende Effekte in der späteren Überprüfung der Konzepte deutlich aufzeigen zu können, muss eine sinnvolle Auswahl an Lagenaufbauten getroffen werden, sodass die Effekte im Idealfall auf so wenige Einflussfaktoren wie möglich zurückgeführt werden können. Insgesamt sollen drei verschiedene Aufbauten getestet werden.

Der erste Aufbau ist ein reiner CFK-Aufbau und dient als Referenz. Um so viele Störfaktoren wie möglich auszuschließen, soll ein quasi-isotroper, möglichst kopplungsfreier Aufbau gewählt werden. Das Werkzeug des Omega-Profils wurde so konzipiert, dass die Profile eine Dicke von ca. 2,07 mm aufweisen können, damit das Werkzeug optimal schließt. Bei einer ausgehärteten Lagendicke von 0,13 mm kommt bei reinem CFK also ein Laminat von 2,08 mm zustande, welches sich aus 16 Lagen zusammensetzt. Diese 16 Lagen werden so aufgebaut, dass ein symmetrisches Laminat entsteht. Es liegt eine Spiegelebene zwischen Lage 8 und 9. Nach der klassischen Laminattheorie führen unterschiedliche Lagenaufbauten zu bestimmten Kopplungseffekten, wenn das Laminat auf Zug oder Biegung belastet wird. Bei symmetrischen Aufbauten ist die gesamte Koppelsteifigkeitsmatrix B_{ij} der ABD-Matrix gleich null, sowie die Koeffizienten A_{16} und A_{26} ³.

Bei dieser Lagenanzahl kann ein besonderer Lagenaufbau gewählt werden, bei dem noch zwei weitere Koppelleffekte D_{16} und D_{26} aus der Plattensteifigkeitsmatrix D_{ij} gleich null gesetzt werden können. Diese Koppelleffekte beschreiben die Kopplung von Torsion und Biegung. Um dies zu erreichen, werden die $+45^\circ$ - und -45° -Lagen an der Symmetrieebene noch einmal umgedreht. Dieser Aufbau nennt sich symmetrisch/antimetrisch (Siehe Tabelle 3). Außerdem kann dieser Aufbau vollständig quasi-isotrop aufgebaut werden, sprich es gibt jede Lagenorientierung genau viermal und somit verhält sich das Laminat in allen Raumrichtungen bis auf in Dickenrichtung gleich. Da der Hotforming-Prozess sich bereits in der Praxis bewährt hat, soll das Referenzbauteil mittels dieses Verfahrens umgeformt und hergestellt werden. Bei diesem Aufbau wird wegen der Form des Profils ein Spring-In-Effekt erwartet.

Als zweites soll ein Aufbau mit einer Stahlfolie untersucht werden. Die Positionierung der Stahlfolie in dem Lagenpaket hat einen sehr großen Einfluss auf die auftretenden Verformungseffekte. Als erstes muss diskutiert werden, ob die Stahlfolie an der Außenseite oder innerhalb des Stacks platziert werden soll. Ein Vorteil der Platzierung innerhalb des Laminats ist, dass ein symmetrischer Aufbau möglich ist. Bei einer Platzierung von einer Folie an der Außenseite ist in keinem Fall ein symmetrischer Lagenaufbau möglich und man erhält immer einen Bi-Metall-Effekt, der durch die die Kopplungseffekte B_{11} und B_{22} ⁴ beschrieben wird.

Unter der Berücksichtigung der in Kapitel 3.2 genannten Konzepte, ist es sinnvoll eine Metallfolie als äußerste Lage im Laminat zu platzieren, da gerade beim Umformen unter dem Eigengewicht des Werkzeugs die Reibung an der Unterseite eine wichtige Rolle spielt, die durch die Stahlfolie an der Außenseite deutlich herabgesetzt werden kann. Da dadurch ein Bi-Metall-Effekt auftreten wird, kann in diesem Fall zusätzlich untersucht werden, ob es zu

³ A_{16} und A_{26} = Beziehung zwischen Schubbeanspruchung und Dehnung

⁴ B_{11} und B_{22} = Beziehung zwischen Dehnung und Biegung

einer Überlagerung von Eigenspannungen kommt, wenn man die vorgeformten Stahlfolien und die nicht vorgeformten miteinander vergleicht. Wenn das Vorformen einen Einfluss auf die eingebrachten Eigenspannungen hat, müssten sich die Winkel der Bauteile am Ende unterscheiden, da bei den vorgeformten Bauteilen die Rückstellkraft wegfallen sollte. Um trotzdem weiterhin möglichst viele Koppeleffekte auszuschließen, sind die CFK-Lagen in sich als symmetrisch/antimetrisches Laminat aufgebaut. Durch ihre Stärke von 0,25 mm entspricht die Folie zwei CFK-Lagen, sodass der Stack aus 14 Prepreg-Lagen und der Metallfolie aufgebaut wird und insgesamt eine Dicke von 2,07 mm aufweist. Dadurch, dass zwei Prepreg-Lagen durch die Metallfolie ersetzt werden, kann das Laminat nicht mehr quasi-isotrop aufgebaut werden. Um die Eigenschaften in möglichst vielen Raumrichtungen dennoch gleich zu halten, wurden zwei 90°-Lagen im Vergleich zur Referenz durch die Metallfolie ersetzt. Das Laminat hat insgesamt einen Metallvolumengehalt von 12%, was dem in Kapitel 2.1 beschriebenen Optimum zur Erhöhung der spezifischen Kennwerte sehr nahekommt. Dieser Aufbau wird im Folgenden als Bi-Metall-Aufbau bezeichnet.

Als drittes soll noch ein Aufbau mit zwei eingelegten Metallfolien untersucht werden. Durch zwei Folien kann auch wieder ein symmetrischer Aufbau erzielt werden und es kann untersucht werden, welchen Einfluss die reine Rückstellkraft der Folien auf die Endgeometrie hat und wie sich dieser Effekt mit dem Spring-In überlagert. Die Metallfolien werden beide außen platziert, um die Reibung beim Umformen am Werkzeug wieder zu verringern. Da die zweite Folie ebenfalls der Dicke zweier ausgehärteter Lagen entspricht, werden zwei der 0°-Lagen durch die zweite Folie ersetzt, um die Quasi-Isotropie so gut wie möglich zu erhalten. Mit zwei Folien im Laminat hat dieses einen Metallvolumengehalt von 24,1%. Dieser Aufbau wird im Folgenden als Zwei-Folien-Aufbau bezeichnet.

Die drei Lagenaufbauten entsprechen den allgemein geltenden Stacking-Regeln von CFK-Laminaten. In Tabelle 3 sind alle Aufbauten in einer Übersicht dargestellt.

3 Probenfertigung

Tabelle 3 Gegenüberstellung der 3 zu untersuchenden Lagenaufbauten mit der jeweiligen Lagenorientierung

Lagennummer	CFK-Referenz	Bi-Metall	Zwei-Folien
1	0	Metall	Metall
2	90		
3	45	0	0
4	-45	45	45
5	-45	-45	-45
6	45	90	90
7	90	-45	-45
8	0	45	45
9	0	0	45
10	90	0	-45
11	-45	-45	90
12	45	45	-45
13	45	90	45
14	-45	45	0
15	90	-45	Metall
16	0	0	
Gesamtdicke	2,08 mm	2,07 mm	2,06 mm

3.4 Vorbehandlung der Stahlfolien

In diesem Kapitel wird auf die Auswahl eines geeigneten Umformverfahrens, die Umformung der Stahlfolien, sowie deren Oberflächenvorbehandlung genauer eingegangen.

3.4.1 Auswahl des Umformprozesses

Bei der Auswahl eines passenden Umformprozesses für die Metallfolien sind mehrere Kriterien ausschlaggebend, die im Folgenden genauer erläutert werden und anschließend in einer Bewertungsmatrix ausgewertet werden sollen. Dazu werden die in Kapitel 2.4 beschriebenen Verfahren miteinander verglichen.

Das erste Kriterium ist die Notwendigkeit eines extra Werkzeuges zum Umformen. Dies ist ein entscheidender Kostenpunkt und erhöht den gesamten Fertigungsaufwand. Dies bezieht sich jedoch nicht auf Maschinen, die bei Zulieferern bereits verfügbar sind und direkt genutzt werden können, sondern auf Sonderanfertigung extra für die vorgegebene Omega-Form.

Anschließend an das erste Kriterium wird außerdem der Aufwand zur Herstellung des Hilfsfertigungswerkzeugs bewertet. Während zum Beispiel sehr massive Werkzeuge für Streck- und Tiefziehen benötigt werden, können sehr einfache Werkzeuge beim Biegen mit der Hand verwendet werden, was sich ebenfalls in dem Aufwand und den Kosten der Fertigung widerspiegelt.

Als drittes Kriterium werden die Kosten bewertet. Diese beinhalten z.B. die Fertigung eines Hilfswerkzeugs, den gesamten zeitlichen Aufwand, Kosten zum Betreiben der Maschine etc. In Kleinserien werden die Kosten meist höher, da bei größeren Stückzahlen Fixkosten die zum Beispiel beim Aufheizen der Maschine entstehen, auf eine größere Teilezahl verteilt werden können.

Das nächste Kriterium bewertet die Genauigkeit des Verfahrens, sprich wie nah es an die Endkontur formen kann. Je genauer das Verfahren die geforderte Kontur abformen kann, desto besser ist es geeignet. Im Gesamtbild muss dies jedoch noch mit dem Aufwand und Kosten ins Verhältnis gesetzt werden.

Bei einigen dieser Verfahren ist zu beachten, dass sie nur den großen Radius des Omegas abbilden können, während andere in der Lage sind, die gesamte Kontur in einem Arbeitsschritt abzuformen.

Ein weiterer Punkt, der in die Bewertung einfließt, ist die Fähigkeit des Verfahrens Federblech umzuformen. So müssen beim Rundbiegen zum Beispiel deutlich kleinere Walzdurchmesser gewählt werden, um im Vergleich zu handelsüblichen Stählen die gleichen Radien erzeugen zu können, da die Rückstellkraft der Federbleche deutlich höher ist.

Als letztes wird bewertet, ob die geringe Folienstärke von 0,25 mm beim Umformen ein Problem darstellen könnte, da Bleche sonst in Stärken von 0,5 mm bis zu 10 mm umgeformt werden.

Die oben genannten Kriterien sind in der folgenden Bewertungsmatrix zusammengefasst und werden danach ausgewertet.

Tabelle 4 Bewertungsmatrix zur Auswahl des Umformverfahrens

	Tiefziehen	Streckziehen	Biegen (maschinell)	Biegen (händisch)	Inkrementelle Blechumformung
Extra WZ ⁵ Notwendig	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein
Aufwand für Hilfswerkzeug	Hoch	Hoch	Keiner	Gering	Keiner
Kosten	Hoch	Hoch	Mittel	Gering	Mittel
Eignung des Verfahrens zur Umformung von Federblech	Keine Information	Keine Information	Niedrig	Mittel	Mittel
Genauigkeit	Hoch	Hoch	Hoch	Gering bis Mittel	Hoch
Gesamte Omega-Form abformbar	Ja	Nur großer Radius	Nur großer Radius	Ja	Ja
Limitierung durch Folienstärke	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja

Die einzelnen Faktoren werden in einem ersten Schritt mit einem Multiplikator versehen, der die Wichtigkeit des jeweiligen Faktors gewichtet. Diese Auswahl erfolgt auf Basis der in Kapitel 2 erarbeiteten Grundlagen und mehreren Expertengesprächen. Die Multiplikatoren liegen zwischen 1 und 5.

Die größten Probleme und damit auch der größte Einfluss auf die Eignung des Verfahrens entstehen durch die geringe Folienstärke in Verbindung den Federblecheigenschaften der Metalllegierung. Diese beiden Faktoren sind deshalb mit dem Multiplikator 5 versehen.

Durch die geringe Anzahl an Testbauteilen und dem Konzeptniveau der Untersuchungen sind die Kosten ein weiterer limitierender Faktor und werden deshalb mit dem Faktor 4 multipliziert.

Die Notwendigkeit eines extra Werkzeugs und der Aufwand für die Herstellung dieses Werkzeugs sind in den Kosten mit betrachtet, da diese beiden Faktoren jedoch großen zeitlichen Einfluss auf den gesamten Fertigungsprozess haben, sind sie mit dem Multiplikator 3 versehen.

Die Abformbarkeit der gesamten Omega-Form ist ebenfalls mit dem Multiplikator 3 versehen, da bei Verfahren, die nur den großen Radius abformen können noch ein weiterer

⁵ WZ = Werkzeug

Umformschritt erfolgen muss, der gegebener Auswahl dieses Verfahrens noch genauer untersucht werden muss.

Am niedrigsten wird die Genauigkeit bewertet, da laut Expertenmeinung die grob vorgeformten Folien schon einen Einfluss auf die zu untersuchenden Effekte haben.

Die Felder, die mit „Ja“ oder „Nein“ beantwortet werden, werden jeweils mit 0 Punkten oder 1 Punkt bewertet. Felder mit Abstufungen werden mit „Hoch“, „Mittel“, „Gering“ oder „Kein“ bewertet und je nach Fragestellung zwischen 0 und 3 Punkten bewertet. Die Zeile „gesamte Omega-Form abformbar“ ist in „Ja“, „Nur der große Radius“ oder „Nein“ eingeteilt und wird zwischen 2 und 0 Punkten bewertet.

Die gesamte Bewertung ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5 Auswertung der Bewertungsmatrix zur Auswahl des Umformverfahrens

	Multiplikator	Tiefziehen	Streckziehen	Biegen (maschinell)	Biegen (händisch)	Inkrementelle Blechumformung
Extra WZ Notwendig	3	0	0	1	0	1
Aufwand für Hilfswerkzeug	3	0	0	3	1	3
Kosten	4	0	0	2	1	2
Eignung des Verfahrens zur Umformung von Federblech	5	1	1	0	1	1
Genauigkeit	2	3	3	3	2	3
Gesamte Omega-Form abformbar	3	2	1	1	2	2
Limitierung durch Folienstärke	5	0	0	0	1	0
Gesamtpunktzahl		17	14	29	28	37

Nach der Gesamtpunktzahl wäre das optimale Verfahren die inkrementelle Blechumformung. Nach mehreren Expertengesprächen und Anfragen an Fachfirmen ist die Blechstärke jedoch wie angenommen der limitierende Faktor. Die Maschinen sind bei dieser geringen Blechstärke in Verbindung mit den Eigenschaften des Federblechs nicht in der Lage, die Metallfolien ausreichend zu formen.

Tiefziehen und Streckziehen fallen als Verfahren heraus, da die Fertigung der nötigen Werkzeuge sowohl den Zeit- als auch den Kostenrahmen gesprengt hätte. Beim maschinellen Biegen war genau wie bei der inkrementellen Blechumformung das Problem, dass die geforderten Radien nur durch sehr kleine Walzdurchmesser erzielt werden können, was ebenfalls in Verbindung mit der geringen Blechstärke auf keiner Maschine realisiert werden konnte.

So ist durch die Limitierung der Blechstärke und die Probleme der Federblecheigenschaften das händische Biegen die sinnvollste Umformmethode, um die Tests durchzuführen.

3.4.2 Umformen der Stahlfolien

Wie in Kapitel 3.4.1 erläutert, werden die Metallfolien durch Biegen per Hand in die passende Omega-Form gebracht.

Das Biegen erfolgt über verschiedene Radien, um den finalen Radius möglichst genau abzubilden. Durch die Eigenschaften des Federstahls müssen deutlich kleinere Radien gewählt werden, über die die Stahlfolie gebogen wird, um die elastische Dehnung zu überwinden und damit die nötigen Fließspannungen in das Material einzubringen. Pro Presszyklus werden zwei Lagenaufbauten in der Presse gefahren, sodass sich daraus eine Größe der Stahlfolien von 250 mm x 205 mm ergibt.

Durch Vorformtests hat sich ergeben, dass die Länge von 250 mm zu lang ist, um diese händisch in die angestrebte Omega-Form zu bringen, da nicht über die gesamte Länge eine konstante Kraft zur gleichmäßigen Umformung aufgebracht werden kann. Bei der Hälfte der Länge stellt dies jedoch kein Problem mehr da, wodurch bei den Testteilen mit vorgeformten Stahlfolien in einem Zyklus vier statt zwei Bauteile gefahren werden.

Das Blechbiegen erfolgt in vier Schritten. Als erstes werden die zu biegenden Bereiche auf der Metallfolie angezeichnet. Als Biegehilfswerkzeuge werden Rohre verschiedener Durchmesser verwendet, auf denen eine Hilfslinie zum Ausrichten des Blechs angezeichnet wird.

Die ersten Radien, die abgeformt werden, sind die zwei äußeren Radien, da diese nur sehr schwer nachträglich zu biegen sind. Das Blech wird während des Umformvorgangs an dieser Stelle stark überbogen, um die 13 mm des Radius genau abzubilden. Das dabei verwendete Rohr hat einen Radius von 6,5 mm.

Anschließend wird der große Radius von 40,5 mm in zwei Schritten über zwei unterschiedliche Rohrdurchmesser gebogen. Dies erfolgt schrittweise. Dafür werden im Abstand von 10 mm Markierungen auf dem Blech gemacht, um das Blech auf dem Rohr mittig platzieren zu können. Das Biegen erfolgt nun jeweils aus der Mitte nach außen und den markierten 10 mm Abständen. Dieser Vorgang wird zweimal wiederholt. Beim zweiten Mal wird jedoch ein geringerer Rohrdurchmesser von 18 mm statt vorher 26 mm genutzt. Dieser Vorgang ist in Abbildung 18 dargestellt.

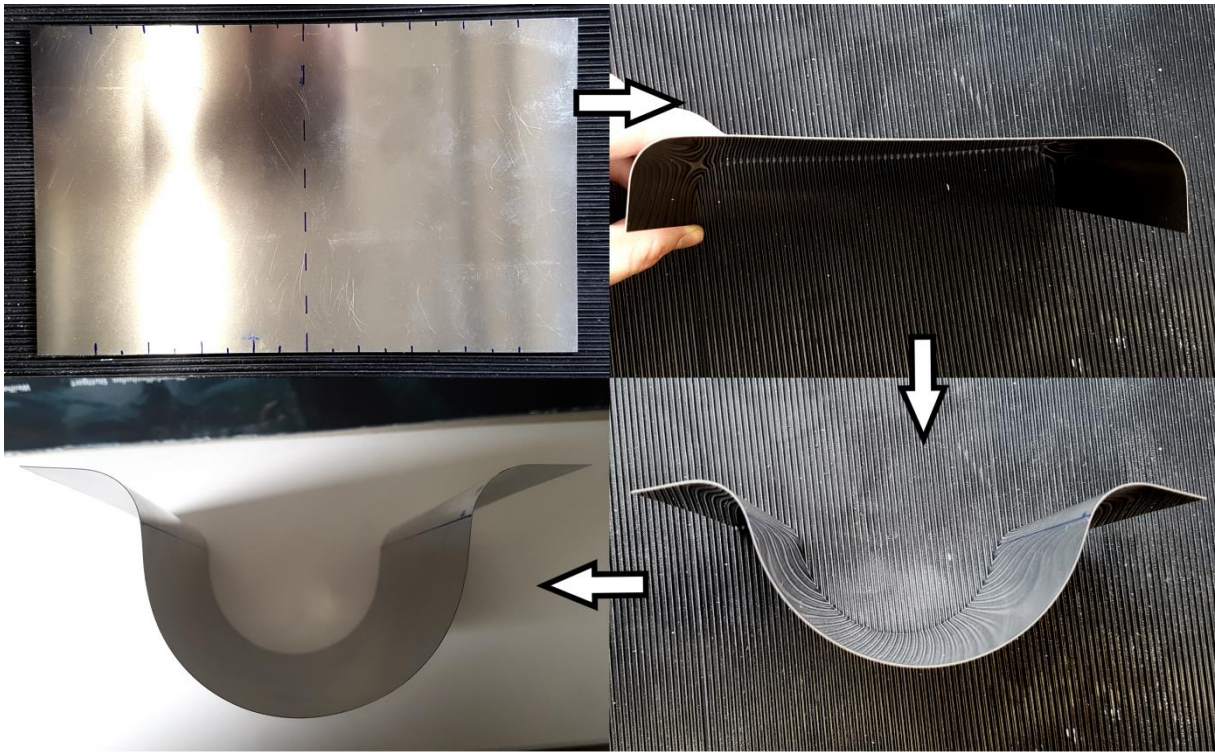


Abbildung 18 Abfolge der vier notwendigen Schritte zum händischen Blechbiegen der Omega-Form

Um anschließend zu überprüfen, wie gut die händisch umgeformten Stahlfolien der Sollgeometrie entsprechen, werden diese mit Hilfe des sogenannten ATOS-Vermessungssystems vermessen.

Das System arbeitet mit zwei Kameras, die auf einem gemeinsamen Gestell montiert sind. Über Zielmarken auf dem Bauteil bzw. in der aufgenommenen Umgebung, kann das System referenzieren, in welchem Blickwinkel es gerade die Bauteile betrachtet. Durch die Projektion von Linien auf den aufzunehmenden Bereich und deren Verformung auf den Oberflächen, kann das System eine Oberfläche berechnen. In diesem Fall sind die Bauteile auf einem drehbaren Tisch platziert, welcher mit Zielmarken markiert ist. Es werden nun Bilder aus verschiedenen Winkeln aufgenommen, um so nach Möglichkeit ein vollständiges Bild der dreidimensionalen Geometrie zu erhalten. In der Software GOM Inspect wird anschließend aus diesen Bildern ein Netz aus Oberflächenpunkten erstellt, die die Oberfläche des Bauteils abbilden. Dieses Netz kann anschließend gegen das CAD-Soll-Modell abgeglichen werden.

Das zweiteilige Werkzeug führt dazu, dass es auch zwei Oberflächengeometrien mit unterschiedlichen Radien gibt. Da man beim Umformen per Hand nicht so genau arbeiten kann, wie beim Umformen mit einer Maschine, gibt es eine größere Streuung der Abmaße. Mit Hilfe der Auswertung soll entschieden werden, ob das vorgeformte Blech die Abmaße der Stempel- bzw. der Muldenseite hat.

In Abbildung 19 ist die Auswertung exemplarisch für den Vergleich eines Blechs mit der Stempelseite dargestellt.

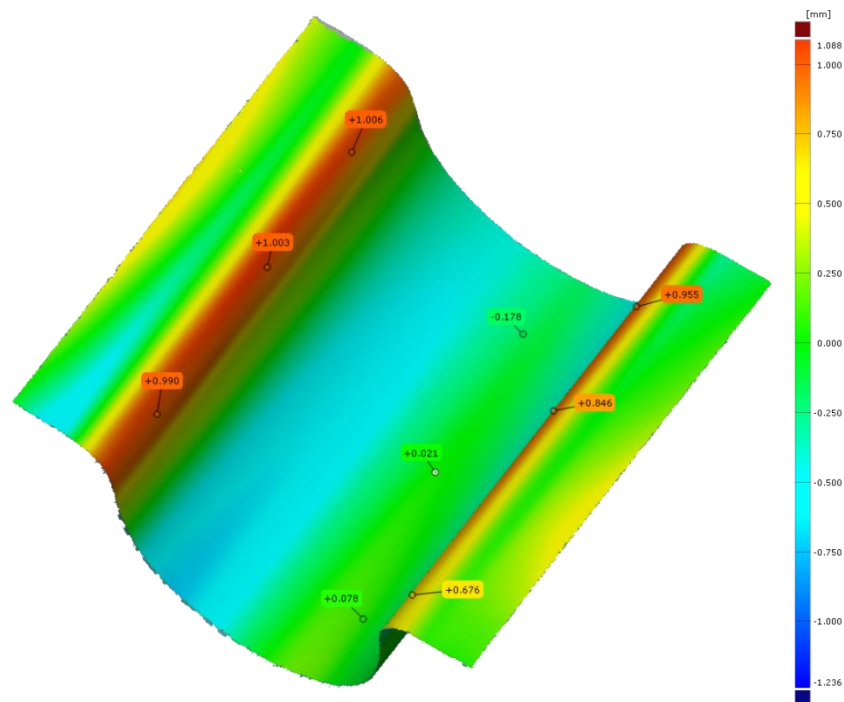


Abbildung 19 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 1 gegen das Stempelseiten CAD-Modell

Es ist zusehen, dass in den kleineren Radien zum Teil Abweichungen von bis zu 1 mm auftreten, die Vorformung insgesamt aber ein gutes Ergebnis erzielt hat. Dieses exemplarische Beispiel ist auf Grund des Ergebnisses auf der Stempelseite verbaut worden.

Positive Abweichungen bedeuten, dass die Soll-Kontur unter dem gezeigten Bauteil liegt. Die gemessene Oberfläche weicht also um $+x$ mm von der Soll-Geometrie ab. Negative Abweichungen zeigen genau das Gegenteil. Die Ist-Geometrie liegt unter der Soll-Geometrie und weicht so um $-x$ mm ab.

Insgesamt werden sechs Bleche benötigt, da zwei Bauteile in dem Zwei-Folien-Aufbau gefertigt werden sollten und zwei in dem Bi-Metall-Aufbau. Tabelle 6 zeigt hierzu einmal die maximal gemessenen Abweichungen der vorgeformten Bleche. MS und SS beschreiben, zu welchem CAD-Modell verglichen wird, wobei MS für Muldenseite, also die untere Werkzeughälfte, und SS für die Stempelseite, die obere Werkzeughälfte, steht.

Die erste Zeile „max. Abweichung Schenkel“ zeigt die maximale, an den Schenkeln aufgetretene Abweichung an, während die zweite Zeile die maximale Abweichung im unteren größeren Radius anzeigt. Es ist sehr gut zu erkennen, dass die Ergebnisse dicht beieinander liegen. Die Bauteile 4,5 und 6 zeigen negative Abweichungen. Das bedeutet, dass diese Folien nicht soweit vorgebogen worden sind. Dies hat den Vorteil, dass diese Folien sich besser an die Muldenseite anlegen, da ein zu klein gebogener Radius immer einen Abstand zwischen der Folie und dem Bauteil erzeugen würde.

Die Folien 1 und 3 weisen stempelseitig die geringsten Abweichungen zum CAD-Modell und werden somit auf der Stempelseite verbaut, während die Folien 2,4,5 und 6 auf der Muldenseite eingelegt werden. In der Tabelle wird durch die grün hinterlegte Schrift angezeigt, welche Folie auf welcher Werkzeugseite verbaut wird.

Alle weiteren Abweichungsanalysebilder finden sich in Anhang B.

Tabelle 6 Maximale Abweichungen der vorgeformten Folien

Bauteil	1		2		3		4		5		6	
WZ-Seite	MS	SS	MS	SS	MS	SS	MS	SS	MS	SS	MS	SS
max. Abweichung Schenkel	2,55	1,00	2,77	1,5	2,9	1,40	-2,45	-3,1	-3,50	-4,6	-4,50	-5
max. Abweichung gr. Radius	-0,85	-0,48	-1,10	-0,88	-0,72	-0,20	2,41	3	1,97	2,4	2,78	3

3.4.3 Sol-Gel-Prozess

Die Vorbehandlung der Stahlfolien im Sol-Gel-Prozess erfolgt immer in zwei Schritten. Als erstes wird die Folie gereinigt und die auf dem Metall befindliche Oxidschicht wird mechanisch entfernt. Anschließend wird der Haftvermittler aufgetragen, der zum einen eine bessere Anhaftung an die Matrix zu gewährleisten und zum anderen die oxidfreie Oberfläche zu konservieren. Unter Vakuum gelagert kann die vorbehandelte Folie innerhalb von 24 Stunden verarbeitet werden.

Für die nicht gekrümmten Folien wird am DLR ein selbstentwickelter Prozess genutzt. Der sogenannte Saugstrahlprozess ist in der Lage, die Oxidschicht von Folien zu bis zu einer Stärke von 0,05 mm zu entfernen, ohne diese dabei zu beschädigen. Die Folie kann von der Rolle direkt durch die Maschine gezogen werden, das Strahlgut wird auf die Oberfläche geschossen und danach direkt wieder abgesaugt. Die Folie wird über ein Walzsystem eigenständig eingezogen und wieder herausgeführt. Anschließend werden die Folien zugeschnitten und in dem Sol-Gel-Prozess behandelt. Dafür wird das AC-130-2 Kit der Marke 3M verwendet. Für die nicht vorgeformten Folien werden die zwei Komponenten in der Flasche vermischt und anschließend in eine Wanne gegeben, in der die Folien dann geschwenkt werden, bis die Oberflächen vollständig benetzt sind. Dies dauert pro Folie etwa drei Minuten und anschließend werden die Folien eine Stunde zum Trocknen aufgehängt.

Die vorgeformten Folien können aufgrund ihrer Geometrie nicht mehr in der Saugstrahlanlage vorbehandelt werden. Da die Oxidschicht vor der Sol-Gel-Behandlung zwingend entfernt werden muss, werden die Folien in diesem Fall vorher sandgestrahlt. Die Folienstärke von 0,25 mm und ein geringerer Druck, mit dem das Strahlgut auf die Oberfläche geschossen wird, erlauben hier den Einsatz von Sandstrahlen. Dünnere Folien lassen sich nicht sandstrahlen, da das Strahlgut die Folie durchdringen würde.

Im Anschluss können die Folien nicht in der Wanne geschwenkt werden, um die Oberfläche zu benetzen, sondern das Sol-Gel muss mit Hilfe eines Pinsels appliziert werden.

3.5 Umsetzen der Konzepte

In den folgenden Kapiteln wird die Herstellung der Bauteile, die Umsetzung der in Kapitel 3.2 erarbeiteten Konzepte, die dafür notwendigen Vorbereitungen, sowie die auftretenden Probleme genauer erläutert.

3.5.1 Werkzeugmodifikation

Bevor alle drei Konzepte auf dem Werkzeug umgesetzt werden können, muss das Werkzeug modifiziert werden. Das in Kapitel 3.2.2 erarbeitete Konzept, bei dem das gesamte Lagenpaket unter dem Eigengewicht des Werkzeugs umgeformt werden soll, setzt eine Führung voraus, sodass die zwei Werkzeugformhälften mittig aufeinander geführt werden können. Abbildung 20 zeigt, wie die beiden Werkzeughälften vor der Modifikation aussahen und ihre Ausrichtung zueinander.

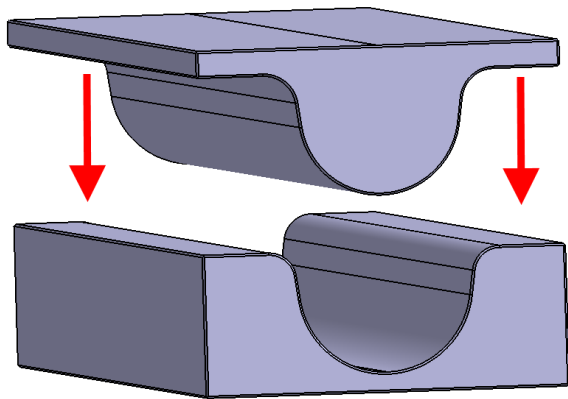


Abbildung 20 Werkzeug vor Modifikationen aus CAD



Abbildung 21 Werkzeug nach Modifikationen

Da der Bauraum der Presse nur eine Höhe von ca. 12 cm und das Werkzeug im zusammengefahrenen Zustand eine Gesamthöhe von ca. 8 cm aufweist, muss das System sehr klein oder demontierbar sein. Dazu kommt, dass bei diesem Konzept das Werkzeug vollständig aufgefahren werden muss, da das vorher abgelegte Laminat flach auf der unteren Werkzeughälfte platziert wird. Aufgefahren kommt das Werkzeug auf eine Höhe von ca. 14 cm, sodass insgesamt ein Weg von 6 cm geführt werden muss. Hierauf wird noch einen Puffer gerechnet, um das Laminat beim ungleichmäßigen Handling der oberen Formhälfte nicht direkt zu berühren. Außerdem braucht die Presse einen guten Kontakt zur Werkzeug Ober- und Unterseite, um die Wärme so gut wie möglich über die Pressplatten in das Werkzeug zu übertragen. Daher kann auf der Ober- und Unterseite des Werkzeugs nichts Permanentes montiert werden.

Um den Fertigungsaufwand für die Modifikationen so gering wie möglich zu halten, wird von aufwändigen Mechanismen, die während des Pressenzyklus am Werkzeug verbleiben können, wie beispielsweise einem Scherenlift, abgesehen.

Die einfachste Form der Führung ist eine Linearführung. Da das Werkzeug händisch geöffnet und geschlossen wird und das Werkzeug durch die Linearführung nur vertikal bewegt wird, wird eine einfache Schiene als gute und einfach umsetzbare Lösung erachtet. An der Unterseite des Werkzeugs sind hierfür auf den Stirnseiten jeweils zwei M5 Gewinde eingearbeitet, in denen ein Item-Profil verschraubt werden kann. Außerdem werden die Profile diagonal montiert, so dass ein Abkippen des Werkzeugs verhindert wird (siehe Abbildung 21).

In der Flucht der Nut des Item-Profils ist in der Oberseite des Werkzeugs ein Gewinde eingebracht, um eine Rundkopfschraube darin zu befestigen, die die obere Werkzeughälfte mittig fluchtend zur unteren hält. Da die Item-Profile an den Stirnseiten nicht abgeschlossen sind, kann die obere Werkzeughälfte einfach abgenommen werden. Die Profile sind mit jeweils zwei Schrauben befestigt, die eine schnelle Montage und Demontage ermöglichen.

Zusätzlich sind an beiden Werkzeughälften Griffe montiert, um das Handling der 25 kg und 30 kg schweren Formhälften zu vereinfachen. Um die Oberfläche des Werkzeugs zu schützen und das Entformen zu vereinfachen, wird die Oberfläche mit einer Teflonfolie beklebt. Die gesamten Modifikationen sind in Abbildung 21 dargestellt.

3.5.2 Herstellung der Bauteile

Auf das Zuschneiden und die Vorbehandlung der Metallfolien sowie der Prepreg-Lagen wird in diesem Kapitel nicht noch einmal eingegangen. Die Dokumentation beginnt mit dem Aufbau des Laminats.

Im ersten Schritt werden alle Lamine nach den in Kapitel 3.3 beschriebenen Ablageplänen aufgebaut. Dabei wird mit den Prepreg-Lagen begonnen und nach jeweils acht Lagen für mindestens zehn Minuten Zwischenvakuum gezogen, um das Laminat besser zu kompaktieren und auch eingeschlossene Gasbläschen zu evakuieren. Anschließend werden die Metallfolien aufgelegt und ebenfalls über ein Zwischenvakuum mit dem restlichen Stack verbunden.

Der erste Presszyklus wird mit den vorgeformten Metallfolien Bauteilen gefahren. Da die CFK-Lagen nach dem Aufbau des Laminats noch als ebene Platte vorliegen, werden diese mit Hilfe des Diaphragmas im nächsten Schritt in die Omega-Form gebracht. Bei den Zwei-Folien-Aufbauten werden die umgeformten Metallfolien auf der Stempelseite bereits eingelegt, sodass sich die Lamine beim Umformen mit Hilfe des Diaphragmas bereits mit den Folien verbinden. Die Metallfolien der Bi-Metall-Aufbauten sind auf der Muldenseite des Werkzeugs platziert, so dass hier erst der CFK-Anteil dieser Aufbauten alleine umgeformt werden kann. Vor dem Umformprozess werden die vier Lamine mittig in gleichmäßigen Abständen auf dem Werkzeug platziert und das Diaphragma wird aufgelegt. Durch den Anpressdruck des Diaphragmas kleben die Bi-Metall-Aufbauten so fest am Werkzeug, dass nachträgliches Bewegen dazu führen würde, dass die obere Schicht beschädigt wird. Anschließend werden die restlichen vorgeformten Metallfolien auf den vier Aufbauten platziert. Um das Werkzeug während des Pressganges abzudichten und ungewollten Harzaustritt zu vermeiden, wird um die Bauteile ein Korkrand geklebt. Die Zwei-Folien-Aufbauten können durch die nicht haftenden Metallfolien an der Außenseite des Laminats auf dem Werkzeug noch bewegt werden, so dass hier zwischen den Bauteilen zum leichteren Trennen ebenfalls noch Kork platziert wird (siehe Abbildung 22).

Nachdem die Bauteile platziert sind, wird das Werkzeug geschlossen und mit Thermoelementen versehen in die Presse gehoben. Der in der Presse gefahrene Zyklus entspricht dem vom Hersteller empfohlenen Zyklus zum Aushärten der Epoxy-8552 Matrix (siehe Anhang A). Gleichzeitig wird das Presswerkzeug in der Presse mit 7 bar zusammengefahren.

Das anschließende Entformen der Bauteile gestaltet sich durch die vorher auf dem Werkzeug applizierte Teflonfolie problemlos. Abbildung 22 zeigt die entformten Bauteile des ersten Pressgangs.

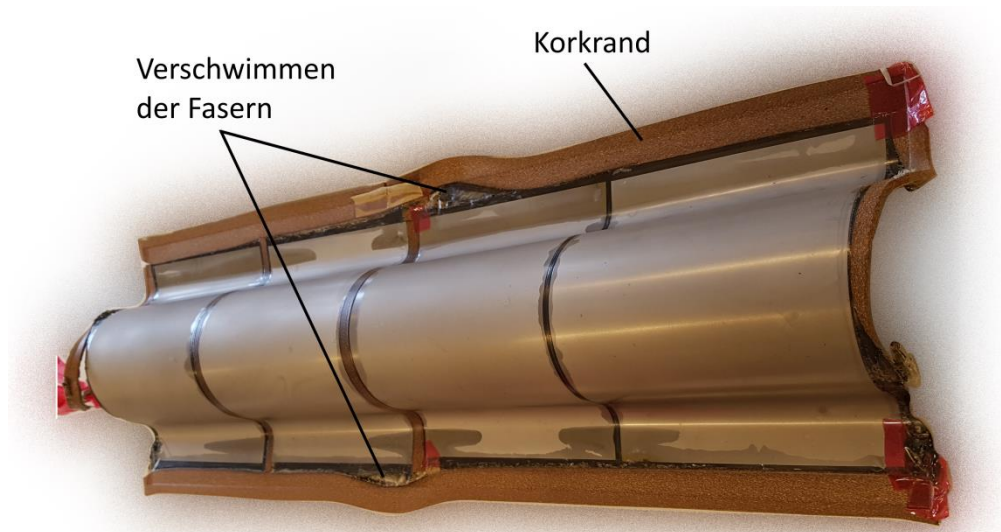


Abbildung 22 Auffälligkeiten bei den entformten, unbesäumten, vorgeformten Bauteilen nach dem Pressgang

Durch den Pressendruck von 7 bar haben sich die Metallfolien zum Teil in die Teflonfolie gedrückt, sodass diese vor dem nächsten Zyklus an einzelnen Stellen ausgebessert werden muss. Es ist auch zu erkennen, dass der hohe Druck zum Austreten des Korks an einigen Stellen geführt hat, was ein Verschwimmen der Fasern zugelassen hat.

Als nächstes Umformkonzept wird das Umformen durch das Eigengewicht des Werkzeugs durchgeführt. Die Führungsschienen werden montiert und das erwärmte Laminat wird mittig auf der Muldenseite des Werkzeugs platziert. Die Stempelseite des Werkzeugs wird anschließend in die Führung gehoben und das Werkzeug gleichmäßig zusammengefahren. Der Widerstand des Laminats ist jedoch so groß, dass selbst nach einer zusätzlichen Last von ca. 180 kg noch kein vollständiges Schließen möglich ist, wie in Abbildung 23 zu sehen.



Abbildung 23 Nicht vollständiges Schließen beim Umformen unter Eigengewicht des Werkzeugs

Bevor das Werkzeug jedoch mit anderen Hilfsmitteln geschlossen wird, wird das Korkband eingebracht, um das Werkzeug nach dem vollständigen Schließen erneut abzudichten. Da das Eigengewicht und das zusätzliche Gewicht noch nicht zum Schließen des Werkzeugs ausreichen, werden an jedem Ende jeweils drei Schraubzwingen montiert. Diese ermöglichen das vollständige Zusammenfahren des Werkzeugs, sodass die Führungsschiene demontiert werden und das Werkzeug in die Presse gehoben werden können.



Abbildung 24 Auffälligkeiten bei den entformten unbesäumten durch Eigengewicht des Werkzeugs umgeformten Bauteilen

Es werden die gleichen Parameter wie beim ersten Zyklus an der Presse gefahren. Die Bauteile lassen sich durch die Teflonfolie wie nach dem ersten Zyklus leicht entformen.

In Abbildung 24 ist zu erkennen, dass der Kork in diesem Zyklus nur an der Stirnseite ausgetreten ist, sich Teile des Laminats zusätzlich jedoch mit dem Kork verbunden haben. Da diese Bereiche im Besäumungsrand des Bauteils liegen, beeinträchtigt dies in keiner Weise die spätere Nutzung.

Das letzte getestete Konzept ist das Umformen mit Hilfe des Diaphragmas. In diesem Zyklus werden einmal die CFK-Referenz und der Zwei-Folien-Aufbau gefertigt.

Auch hier wird das erwärmte Laminat wie im ersten Zyklus mittig auf der Stempelseite fixiert und mit Hilfe des Diaphragmas in Form gebracht. Der Unterschied ist, dass ein ebenes Laminat mit Metallfolien und ein Laminat ohne Metallfolien vorgeformt werden. Abbildung 25 zeigt, dass beide Bauteile unter Vakuum durch das Diaphragma vollständig am Werkzeug anliegen. Die Rückstellkraft der Folien ist dabei jedoch so groß, dass sich, wie in Abbildung 26 zu sehen, nur eine minimale Verformung des Zwei-Folien-Aufbaus nach dem Entfernen des Diaphragmas eingestellt hat, während das reine CFK-Laminat vollständig am Werkzeug anliegt.



Abbildung 25 Vorformen mit Diaphragma unter Vakuum

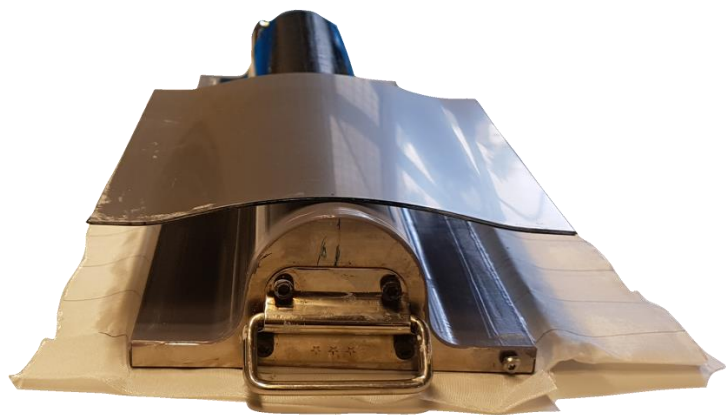


Abbildung 26 Vorgeformte Bauteile nach Entfernen des Diaphragmas

Die leichte Vorformung sorgt dafür, dass das Bauteil nicht mehr auf dem Werkzeug rutscht, sodass die zweite Formhälfte ohne Probleme aufgelegt werden kann. Auch hier kann das Werkzeug nicht vollständig geschlossen werden. Es werden ebenfalls Schraubzwingen verwendet, um das Werkzeug zu schließen.

Der Presszyklus wird mit denselben Parametern wie zuvor ausgeführt. Nach dem Presszyklus können die Bauteile erneut leicht entformt werden. Es ist an den entformten Bauteilen in Abbildung 27 eindeutig zu erkennen, dass das Eindrücken der Metallfolien in die Teflonfolie einen Einfluss auf die Oberflächengüte hat. So ist auf der Oberseite des Referenzbauteils ein Abdruck, der auf eine Beschädigung der Teflonfolie zurückzuführen ist, zu sehen. Wie zuvor haben die Fasern beim Zusammenpressen des Werkzeugs den Korkrand weit nach außen gedrückt, sodass es am Rand zum teilweisen Verschwimmen der Fasern gekommen ist.

Nachdem alle Bauteile gefertigt sind, werden diese anschließend händisch besäumt.

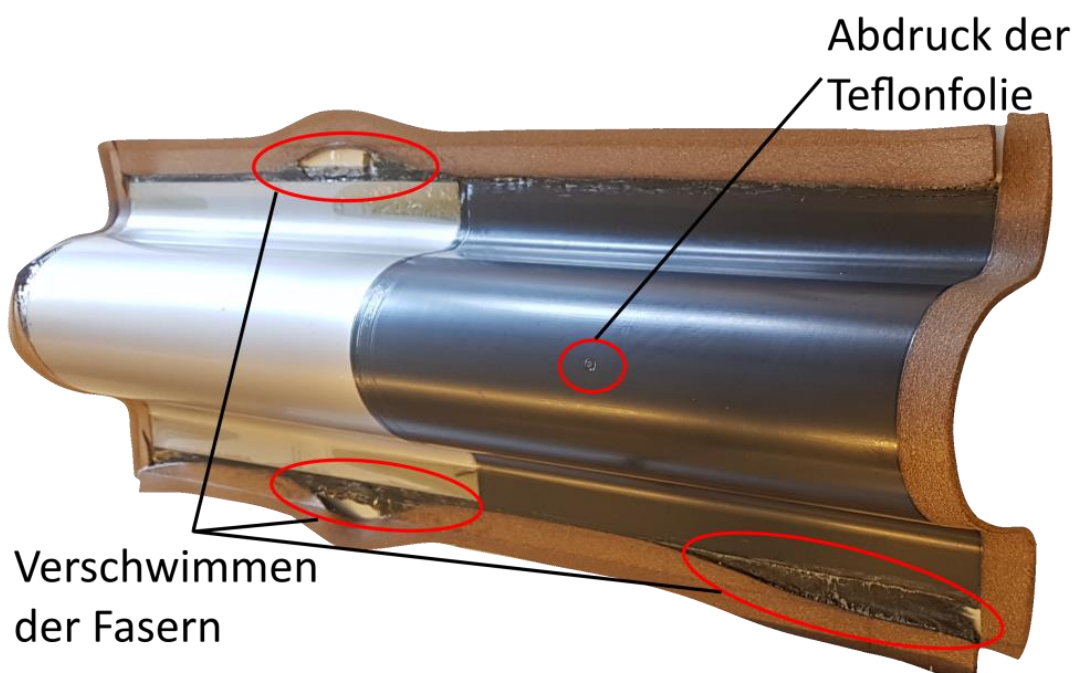


Abbildung 27 Auffälligkeiten bei den entformten durch das Diaphragma umgeformten Bauteilen

4 Auswertung

Die richtige Methode zur Erstellung und Auswertung von Messdaten ist entscheidend für die Qualität der Ergebnisse. In den nachfolgenden Kapiteln werden die in dieser Arbeit verwendeten Methoden, sowie die Auswertung der Daten mit diesen Methoden genau beschrieben.

4.1 Beschreibung der Auswertungsmethoden & Erstellung der Messdaten

Die gefertigten Bauteile können auf verschiedene Arten analysiert werden. Zu Beginn soll auf die geometrischen Abweichungen eingegangen werden.

Wie die vorgeformten Metallfolien in Kapitel 3.4.2 werden die fertigen Bauteile mit Hilfe des ATOS-Messsystems vermessen und in der Software GOM-Inspect ausgewertet.

Die erste Auswertungsreihe bezieht sich auf den Soll-Ist-Vergleich der angestrebten Soll-Kontur aus dem CAD und der nach der Fertigung entstandenen Ist-Kontur. Hierzu werden zunächst CAD-Modelle mit den entsprechenden Dicken der Lagenaufbauten aus Kapitel 3.3 erstellt. Anschließend werden das CAD-Modell und das gemessene Oberflächennetz des jeweiligen Bauteils über eine 3-Punkt-Ausrichtung vorausgerichtet und über ein Best-Fit final zueinander ausgerichtet. Über diese Ausrichtung wird wie in Kapitel 3.4.2 eine Abweichungsanalyse gelegt, auf denen die Abweichungen von Soll- und Ist-Geometrie farbig dargestellt werden. An markanten Stellen können zusätzlich Abweichungsfähnchen gesetzt werden, um Wert der Abweichung an dieser Stelle genau zu erfassen.

Als nächstes soll der Spring-In-Effekt untersucht werden. Abbildung 28 zeigt die Soll-Maße des Omega-Profiles. Die Achse, die durch den tiefsten Punkt des großen Radius verläuft, stellt eine Siegelachse dar. Die in Abbildung 28 grün markierten Bereiche zwischen dem großen und dem kleinen Radius stellen einen ca. 11,5 mm breiten nicht gekrümmten Bereich des Profils dar. Die Schenkel haben an dieser Stelle eine Neigung von 8° , sodass ein Gesamtwinkel von 16° zwischen den Schenkeln entsteht. Um diesen Winkel an den realen Bauteilen zu untersuchen, wird auf die Oberfläche der jeweiligen Schenkel eine Ebene durch ein Best-Fit gelegt. Der Winkel zwischen den Normalen dieser Ebenen zeigt den Winkel zwischen den Schenkeln an, über den die Abweichung zum Soll berechnet werden kann.

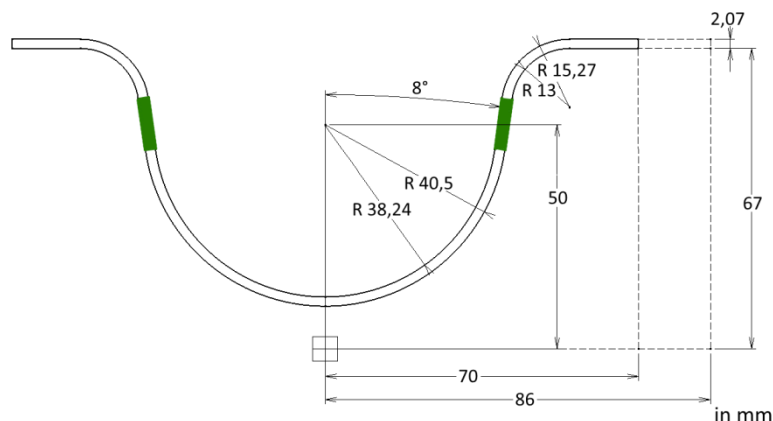


Abbildung 28 Soll-Maße des fertigen Omega-Profiles aus dem CAD

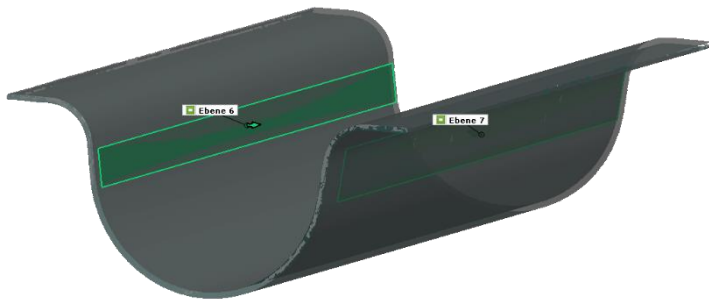


Abbildung 29 Fitting der Ebenen zur Ermittlung des Spring-In

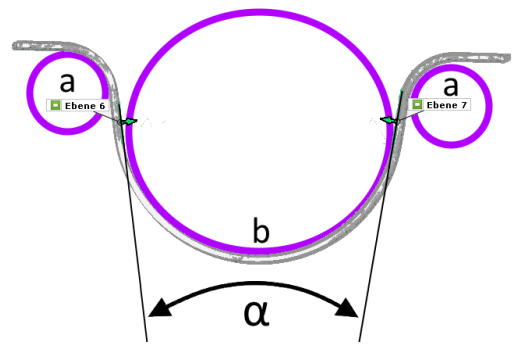


Abbildung 30 Winkel zwischen den Fitting-Ebenen zur Ermittlung des Spring-In

Abbildung 29 zeigt exemplarisch das Fitting der Ebenen. Das Bauteil ist hier leicht transparent dargestellt, damit die gefittete Ebene auf der Innenseite des Schenkels sichtbar ist. In Abbildung 30 ist der resultierende Winkel der beiden Ebenen-Normalen gezeigt und mit α gekennzeichnet.

Als nächstes werden die drei Radien des Omega-Profils untersucht, welche in Abbildung 30 mit a und b gekennzeichnet sind. Die mit a gekennzeichneten Radien weisen in der Soll-Geometrie eine Größe von 13 mm auf, während der Radius b 38,24 mm abbildet. Um diese Radien vergleichbar und über die ganze Länge des Bauteils gut darzustellen, wird in jeden Radius, wie in Abbildung 30 lila markiert, ein Zylinder gefittet. Dazu wird der Bereich des jeweiligen Radius markiert und in diesem Auswahlbereich wird der Zylinder errechnet. Die Zylinder geben Aufschluss darüber, wie sich die Radien während der Fertigung verändert haben.

Zuletzt soll der innere Spannungszustand der Bauteile untersucht werden. Dazu werden sowohl vom Bi-Metall-Aufbau, als auch vom Zwei-Folien-Aufbau jeweils ein Bauteil mit vorgeformten Metallfolien und ein Bauteil, das durch Eigengewicht des Werkzeugs umgeformt wurde, ausgewählt. Diese werden erneut mit Hilfe des ATOS-Messsystems vermessen. Anschließend werden die Metallfolien händisch entfernt, wodurch die im Bauteil eingelagerten Eigenspannungen frei werden und sich das Bauteil deformiert. Dieser Zustand wird erneut mittels des ATOS-Messsystems erfasst und kann mit der ursprünglichen Form der Bauteile verglichen werden. Dieser Vorher-Nachher-Vergleich soll Aufschluss darüber geben, wie groß der Einfluss der Rückstellkraft auf die auftretende Deformation des Bauteils ist.

4.2 Auswertung der Messdaten

Mit den im vorherigen Kapitel erarbeiteten Auswertungsverfahren sollen die gefertigten Bauteile im folgenden Kapitel genauer analysiert werden.

4.2.1 Auswertung des CFK-Referenzbauteils

Als erstes soll die vermessene CFK-Referenz ausgewertet werden.

Dazu wird zunächst der Vergleich zur CAD-Soll-Kontur betrachtet. Die Abweichungsanalyse in Abbildung 28 zeigt eine gleichmäßige Deformation über die gesamte Bauteillänge. Dies ist ein Indikator dafür, dass durch den gewählten Lagenaufbau keine Koppeffekte aufgetreten sind, die zu einer Torsion des Bauteils führen. Die in der Abbildung gelb markierten Bereiche zeigen an, dass die Schenkel an diesen Stellen positiv vom CAD-Modell abweichen. Die gesetzten Abweichungsfähnchen zeigen Werte zwischen 0,51 mm und 0,55 mm. In Verbindung mit den türkisen Bereichen, die zwischen -0,5 mm und -0,53 mm abweichen, weist dieses Verformungsbild auf einen Spring in Effekt hin.

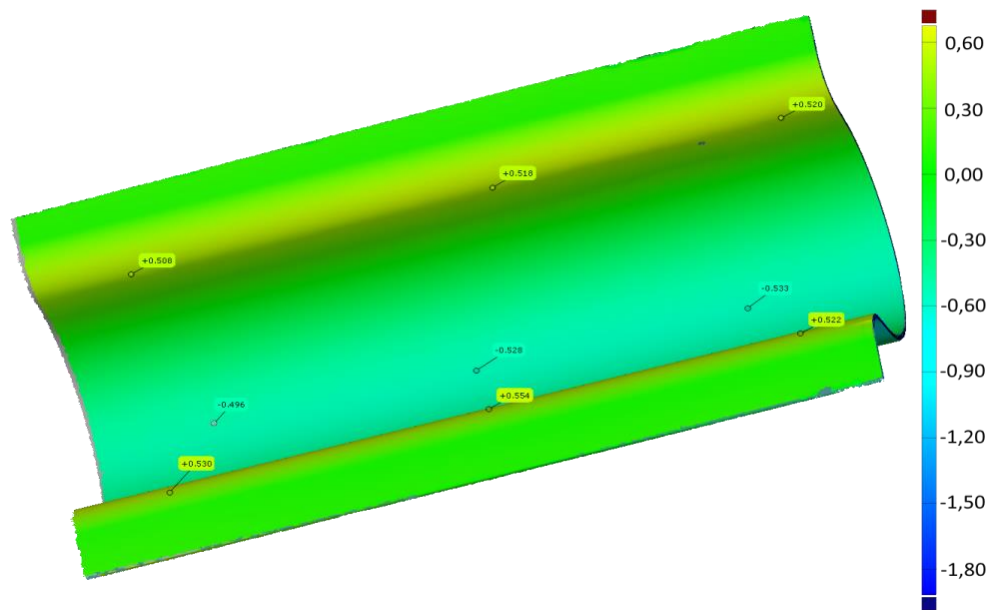


Abbildung 31 Abweichungsanalyse der CFK-Referenz gegen das CAD-Soll-Modell

Untersucht man den Winkel über die Fitting-Ebenen auf den Schenkeln, erhält man einen Winkel von 13,92° und eine Winkelfeile von -2,08° (Siehe Tabelle 7).

Tabelle 7 Winkelabweichungen des Referenzbauteils

Bauteil	Winkel	Δ
CAD-Soll	16°	-
CFK-Referenz	13,92°	-2,08°

Dies bestätigt das erwartete Auftreten des Spring-In-Effekts. Abbildung 32 zeigt den Effekt im Schnitt. Die CFK-Referenz, hier als schwarzer Umriss dargestellt, weicht in den oberen Bereichen der Schenkel positiv und im Scheitelpunkt des großen Radius negativ vom CAD-Modell, hier grün dargestellt, ab.

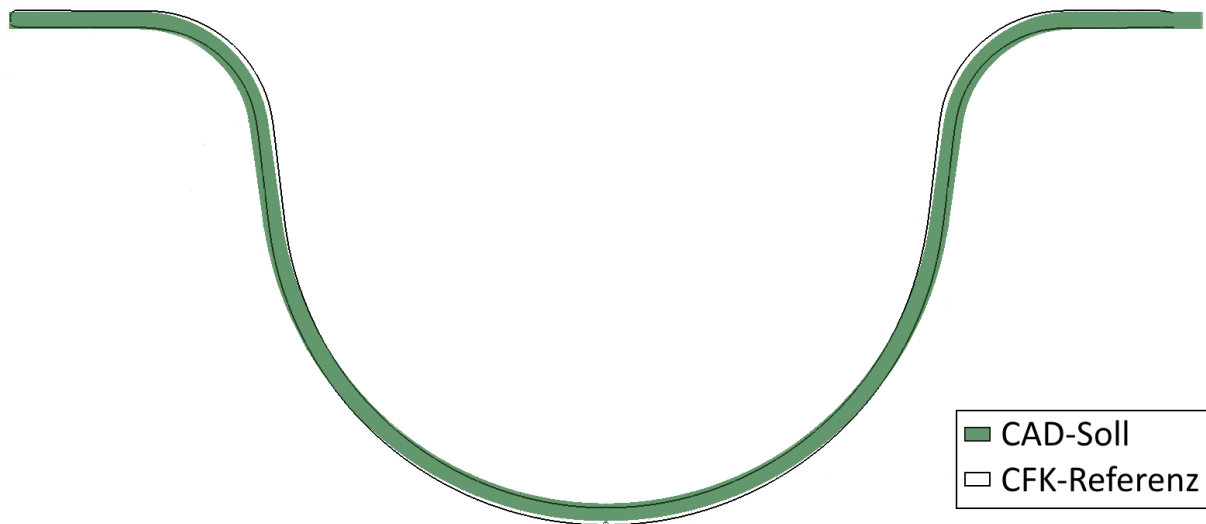


Abbildung 32 Schnittansicht des Soll-Ist-Vergleichs zwischen CFK-Referenz und CAD-Modell

Um einen theoretischen Vergleichswert des Spring-In-Effekts zu errechnen, wird die Formel nach Radford (siehe Kapitel 2.2.1) genutzt. Dafür sind jedoch Werte für die Koeffizienten α_T , α_R , β_T und β_R notwendig. Diese sind durch Wijskamp in seiner Veröffentlichung „Shape distortions in composite forming“ sowohl für den viskosen als auch den ausgehärteten elastischen Zustand bestimmt worden (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8 Thermoelastische Eigenschaften des Prepregs AS4/8552 [16]

	Einheit	Viskos	Elastisch
α_T	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$-4,00\text{e}^{-07}$	$4,10\text{e}^{-06}$
α_R	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$1,05\text{e}^{-04}$	$6,90\text{e}^{-05}$
β_T	einheitenlos	0	$3,70\text{e}^{-04}$
B_T	einheitenlos	$8,40\text{e}^{-03}$	$5,50\text{e}^{-03}$

Da das Material während des Aushärteprozesses erst viskos und dann ausgehärtet (elastisch) vorliegt und dadurch unterschiedliche Materialeigenschaften aufweist, wird für beide Zustände der Spring-In berechnet. Als Soll-Winkel wird in der Formel 164° eingesetzt. Dieser Winkel ergibt sich, da die U-Form des Radius nicht vollständig 180° abbildet, da durch die Neigung der Schenkel von jeweils 8° vom Gesamtwinkel 16° subtrahiert werden müssen, sodass 164° verbleiben. Mit den Koeffizienten für den viskosen Zustand errechnet man für einen Spring-In von $-4,42^{\circ}$. Für den elastischen Zustand ergibt sich ein Spring-In von $-2,73^{\circ}$. Diese Werte weichen beide von dem real gemessenen Wert ab, was mehrere Ursachen haben kann. Zum einen wird in der Formel von Radford zwar der Soll-Winkel betrachtet, jedoch nicht ob dieser Winkel durch eine scharfe Kante oder einen Radius realisiert ist, zum anderen wird die Faserorientierung bzw. der Lagenaufbau außer Acht gelassen. Diese Faktoren haben einen großen Einfluss auf die Endgeometrie und den inneren Spannungszustand des Bauteils.

Zusätzlich kann durch nicht gleichmäßiges Schließen des Werkzeugs und unterschiedliche Bauteildicken im Pressvorgang ungleichmäßig Druck auf das Laminat ausgeübt worden sein, wodurch einige Bereiche stärker und andere Bereiche weniger stark kompaktiert worden sein

können. Stärker kompaktiert bedeutet, dass in diesen Bereichen weniger Matrixmaterial vorhanden ist. Dies wiederum hätte Einfluss auf den örtlichen Schwund des Harzes, da harzreiche Bereiche stärker schrumpfen, was sich in einem stärkeren Spring-In äußert.

Als nächstes werden die drei Radien betrachtet. Dafür werden wie im vorherigen Kapitel beschriebenen Zylinder in den jeweiligen Radius gefittet. Die Radien der gefitteten Zylinder sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9 Radien der gefitteten Zylinder auf der CFK-Referenz

Bauteil	Radius klein		Radius groß
	Links	Rechts	
CAD-Soll	13 mm	13 mm	38,24 mm
CFK-Referenz	12,92 mm	12,92 mm	37,84 mm

Es ist zu erkennen, dass alle drei Radien kleinere Werte im Vergleich zum Soll aufweisen. Diese Werte decken sich mit den Ergebnissen der Spring-In-Analyse.

4.2.2 Auswertung der Bi-Metall-Bauteile

In diesem Kapitel sollen alle Bauteile, die als Bi-Metall-Aufbau gefertigt sind, genauer betrachtet werden. Bei diesen Proben wird die Überlagerung mehrerer Effekte erwartet. Durch die Verwendung der zwei unterschiedlichen Materialien und dem unsymmetrischen Aufbau wird erwartet, dass der Bi-Metall-Effekt die Schenkel der Proben weiter nach außen drückt. Der große Radius sollte sich dadurch anders als beim Spring-In weiten. Der größere thermische Ausdehnungskoeffizient der Folie müsste gleichzeitig dazu führen, dass die kleinen Radien kleiner werden, da die Metallfolie eine größere negative Dehnung erfährt als der CFK-Anteil des Bauteils.

Außerdem müsste die Rückstellkraft der nicht vorgeformten Folien höher sein als die der geformten Folien, sodass die Bauteile mit nicht vorgeformten Folien einen größeren Winkel aufweisen müssten.

Die Abweichungsanalysen aller drei Bauteile weisen ähnliche Ergebnisse auf. In Abbildung 33 ist ein Bauteil mit Bi-Metall-Aufbau exemplarisch dargestellt, die weiteren Bauteile sind in Anhang C aufgeführt.

Das Bauteil in zeigt eine gleichmäßige Deformation über die gesamte Bauteillänge, was erneut auf die Abwesenheit von Torsions-Koppeleffekten hinweist.

Der Farbverlauf der Abweichungsanalyse ist gegensätzlich zu dem Farbverlauf der Referenz. Dies deckt sich mit der Annahme, dass der Winkel des großen Radius durch den Bi-Metall-Effekt geweitet wird und nicht kleiner wird, wie beim Spring-In Effekt. Die Schenkel zeigen Abweichung im Bereich von -2,1 mm, während der Scheitel Abweichungen im Bereich von +1,9 mm aufweist.

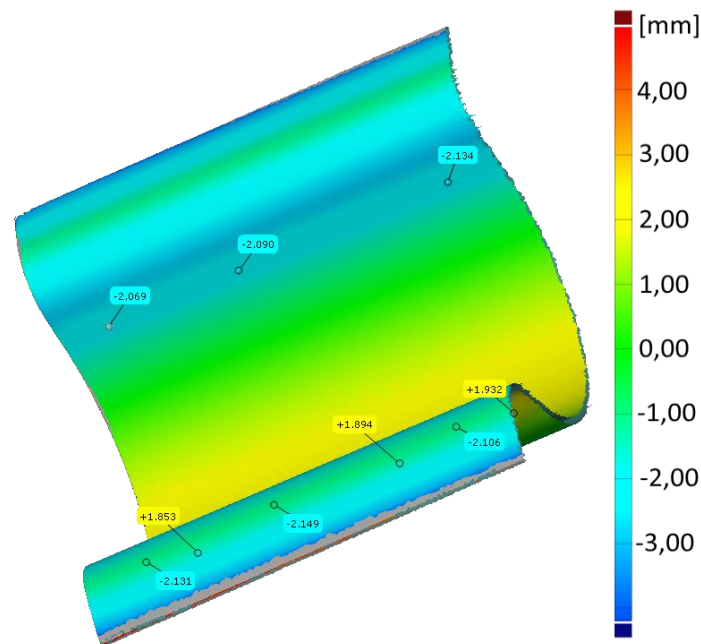


Abbildung 33 Exemplarische Abweichungsanalyse der Bi-Metall-Lamine gegen das CAD-Modell

Welchen Einfluss diese Abweichungen auf den Winkel zwischen den Schenkeln haben, wird mittels der Fitting-Ebenen untersucht. Die gemessenen Winkel der Bauteile sind in Tabelle 10 dargestellt. Es ist zu sehen, dass das Bauteil mit nicht vorgeformten Folien den größten Winkel aufweist. Dies deckt sich mit der Annahme, dass die Überlagerung des Bi-Metall-Effekts und der Rückstellkraft der Folie eine größere Öffnung des Winkels zur Folge hat.

Tabelle 10 Winkelabweichungen der Bauteile mit Bi-Metall-Laminat

Bauteil	Winkel	Δ
CAD-Soll	16°	-
Vorgeformte Folie 1	24,02°	8,02°
Vorgeformte Folie 2	26,05°	10,05°
Umgeformt durch Eigengewicht	28,36°	12,36°

Die Abweichung der Winkel der zwei gleich gefertigten Bauteile kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Die per Hand vorgeformten Metallfolien weisen bereits Abweichungen auf, die sich auf den Spannungszustand im Bauteil auswirken. Vergleicht man die Werte mit den in Kapitel 3.4.2 gemessenen Werten für die vorgeformten Stahlfolien, decken sich die Ergebnisse mit den hier gezeigten. In Bauteil Vorgeformte Folie 1 wurde Folie 3 und in Bauteil Vorgeformte Folie 2 Folie 5 verbaut (Siehe Anhang B). Es ist zu sehen, dass Folie 3 positive Abweichungen von ca. 2 mm im Schenkelbereich zeigt und somit etwas überbogen wurde, während Folie 5 Abweichungen von -2,2 mm aufweist. Die negative Abweichung bedeutet, dass die Folie nicht vollständig in die Form gebogen wurde und somit eine größere Rückstellkraft aufweist. Diese Abweichungen spiegeln sich in den gemessenen Winkeln der fertigen Bauteile wider.

Weitere Eigenspannungen können durch unterschiedliche Abkühlungen induziert worden sein. Das Bauteil, welches dichter am Werkzeugrand platziert ist, wird schneller und anders

abgekühlt, als das Bauteil, das dichter an der Werkzeugmitte platziert ist, da die Wärme in der Werkzeugmitte länger gespeichert bleibt. Zusätzlich unterliegen die Messergebnisse gewissen Abweichungen, da die Auswahl der Flächen, auf denen die Ebenen gefittet werden, von Hand erfolgt.

In Abbildung 34 ist die Gesamtabweichung der drei Bauteile zum CAD-Modell im Schnitt dargestellt. Abbildung 35 zeigt den Ausschnitt des rechten Winkels vergrößert. Es ist erneut zu erkennen, dass der Winkel des unter Eigengewicht des Werkzeugs umgeformten Bauteils am weitesten aufgedrückt wird. Die Kontur der beiden Bauteile mit vorgeformten Folien liegt in diesem Ausschnitt sehr nah beieinander, anders als es durch die gemessenen Winkel zu erwarten wäre. Dies kann auf das Best-Fit der Bauteile zum CAD-Modell zurückgeführt werden, da dieses sich auf das CAD-Modell bezieht. Es werden dadurch die geringsten Abweichungen zum CAD-Modell angezeigt, wodurch die Lage der beiden Bauteile mit vorgeformten Metallfolien zueinander verfälscht werden kann.

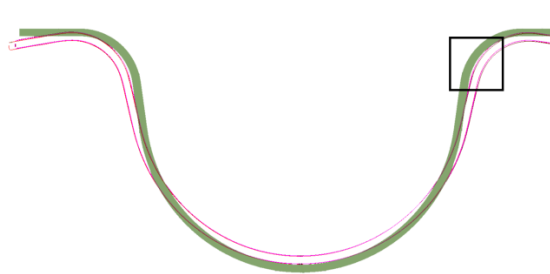


Abbildung 34 Schnittansicht des Soll-Ist-Vergleichs aller Bi-Metall-Lamine und dem CAD-Modell

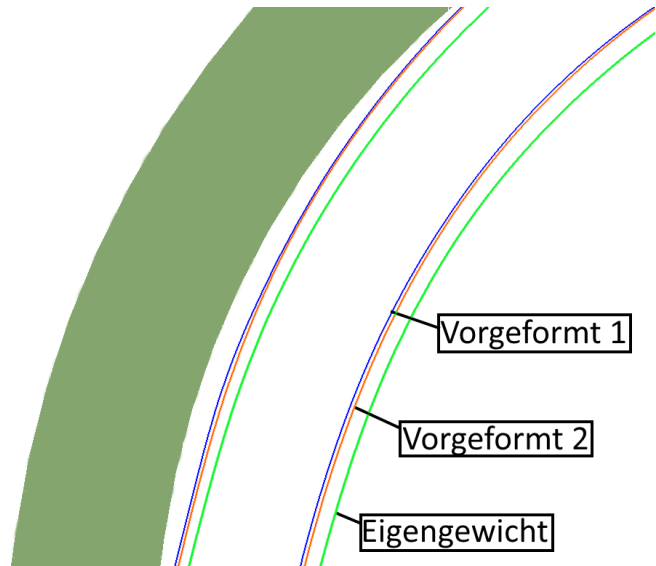


Abbildung 35 Ausschnitt des rechten Winkels der Schnittansicht des Soll-Ist-Vergleichs aller Bi-Metall-Lamine und dem CAD-Modell

Die gemessenen Winkel und die Gesamtabweichung zum CAD-Modell spiegeln sich ebenfalls in der Untersuchung der gefitteten Zylinder wider. Wie in Tabelle 11 zu sehen ist, sind alle gemessenen Radien mit einem Soll von 38,24 mm größer, während die kleinen Radien mit einem Soll von 13 mm wie angenommen im Durchschnitt kleiner sind. Dieses Phänomen ist, wie zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, auf die größere negative Dehnung der Metallfolie zurückzuführen.

Tabelle 11 Radien der gefitteten Zylinder auf den Bi-Metall-Laminaten

Bauteil	Radius klein		Radius groß
	Links	Rechts	
CAD-Soll	13 mm	13 mm	38,24 mm
Vorgeformte Folie 1	12,75 mm	12,85 mm	40,75 mm
Vorgeformte Folie 2	13,00 mm	12,75 mm	41,32 mm
Umgeformt durch Eigengewicht	12,81 mm	12,99 mm	41,50 mm

4.2.3 Auswertung der Zwei-Folien-Bauteile

Im folgenden Kapitel sollen die Bauteile, die als Zwei-Folien-Aufbau gefertigt wurden, genauer untersucht werden. Es wird erwartet, dass die vorgeformten Folien eine geringere Rückstellkraft aufweisen. Hierdurch müssten die Bauteile mit vorgeformten Folien kleinere Winkel zwischen den Fitting-Ebenen aufweisen als die Bauteile, die als Stack umgeformt wurden. In diesem Fall überlagert sich die Rückstellkraft der Folien mit dem Spring-In-Effekt.

Zuerst wird zur Untersuchung der Vergleich der Ist-Geometrie zum CAD-Modell herangezogen. Die Bauteile weisen wie im vorherigen Kapitel ähnliche Abweichungsanalysen auf, sodass Abbildung 36 und Abbildung 37 jeweils eine der Analysen mit vorgeformter Folie und eine mit nicht vorgeformter Folie exemplarisch darstellen. Die gesamten Analysen sind in Anhang D dargestellt.

Es ist zu sehen, dass die Verformung gleichmäßig über die Bauteillänge verläuft. In Abbildung 36 ist ein Zwei-Folien-Aufbau mit vorgeformten Folien dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Farbverlauf dem der CFK-Referenz ähnelt. Dies weist erneut auf einen Spring in Effekt hin. Die gelb markierten Bereiche weisen Abweichungen von ca. 0,3 mm auf, während die türkis markierten Bereiche Abweichungen von ca. -0,35 mm aufweisen.

Abbildung 37 zeigt einen Zwei-Folien-Aufbau mit nicht vorgeformter Folie. Es ist zu erkennen, dass die gleichen Effekte auftreten, wie in Abbildung 36, diese jedoch nicht so stark ausgeprägt sind. Die Schenkel weisen Abweichungen von zwischen 0,08 mm bis 0,09 mm auf, während die Abweichungen im Scheitelbereich zwischen -0,2 mm und -0,24 mm liegen.

Ein ähnliches Ergebnis zeigt die in Tabelle 12 Analyse des Öffnungswinkels. Es ist zu sehen, dass jedes Bauteil einen Spring-In-Effekt zeigt. Die Bauteile mit nicht vorgeformten Folien weisen dabei kleinere Abweichungen zum CAD-Modell auf als die Bauteile mit vorgeformten Folien. Dies ist damit zu begründen, dass der Spring-In-Effekt durch die Rückstellkraft des Blechs in die entgegengesetzte Richtung ausgeglichen wird. Dieser Ausgleich führt dazu, dass die Bauteile geringe Abweichungen zeigen.

Durch die geringere Rückstellkraft verhalten sich die Bauteile mit vorgeformten Folien eher wie die CFK-Referenz mit einer Winkelabweichung von 2,08°. Die geringere Winkelabweichung der Zwei-Folien-Aufbauten ist auf die Metallfolie zurückzuführen. Durch das Vorformen ist der Zustand ohne Rückstellkraft die Omega-Form. Jede Abweichung von

der Form führt zu einer Rückstellkraft unabhängig von der Wirkrichtung, sodass die Kraft in diesem Fall gegen den Spring-In-Effekt arbeitet. Würde man versuchen die Schenkel nach außen drücken, würde die Rückstellkraft dagegenwirken und die Schenkel zum Teil zurück in die ursprüngliche Form nach innen zu drücken.

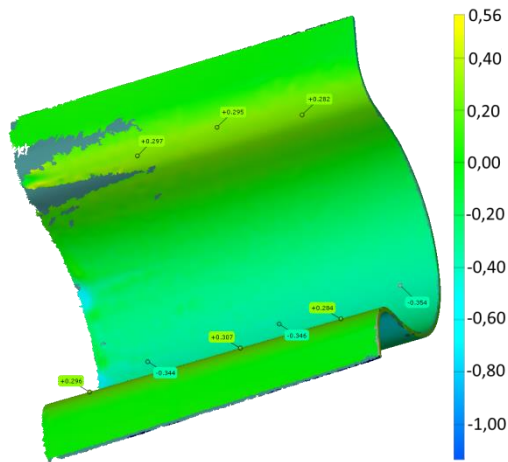


Abbildung 36 Exemplarische Abweichungsanalyse der Zwei-Folien-Lamine mit vorgeformter Folie gegen das CAD-Modell

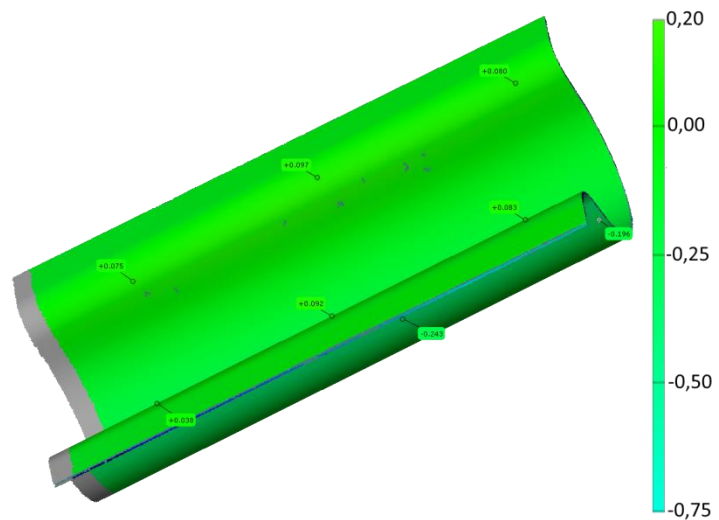


Abbildung 37 Exemplarische Abweichungsanalyse der Zwei-Folien-Lamine mit nicht vorgeformter Folie gegen das CAD-Modell

Tabelle 12 Winkelabweichungen der Bauteile mit Zwei-Folien-Laminat

Bauteil	Winkel	Δ
CAD-Soll	16°	-
Vorgeformte Folie 1	14,40°	1,6°
Vorgeformte Folie 2	14,39°	1,61°
Umgeformt durch Eigengewicht	15,60°	0,4°
Umgeformt durch Diaphragma	15,99°	0,01°

Die Schnittansichten in Abbildung 38 und Abbildung 39 bestätigen die gemessenen Werte. Es ist zu erkennen, dass die in Abbildung 38 im Schnitt dargestellte Abweichung der vier Bauteile gering ist. In Abbildung 39 bestätigen sich die zuvor gemessenen Winkel aus Tabelle 12. Der Spring-In-Effekt der Bauteile mit vorgeformten Folien ist größer als der Spring-In der Bauteile mit nicht vorgeformten Folien.

Die Analyse der gefitteten Zylinder zeigt, wie in Tabelle 13, die gleiche Tendenz wie die Analysen zuvor. Bei den großen Radien mit einem Soll von 38,24 mm ist zu sehen, dass die Bauteile mit vorgeformten Folien einen größeren Spring-In-Effekt aufweisen im Vergleich zu den Bauteilen, die als Stack umgeformt wurden. Die Radien der als Stack umgeformten Bauteile weisen, wie in der Abweichungsanalyse zu sehen ist, nur geringe Abweichungen zum Soll auf.

Da Die Folie in dem symmetrischen Aufbau sowohl auf der Oberseite als auch auf der Unterseite vorhanden ist, führt die Rückstellkraft dazu, dass die kleinen Radien größer abgebildet werden. Außerdem können Abweichungen im Vorformprozess ebenfalls zu Abweichungen in der Abbildung der Radien führen.

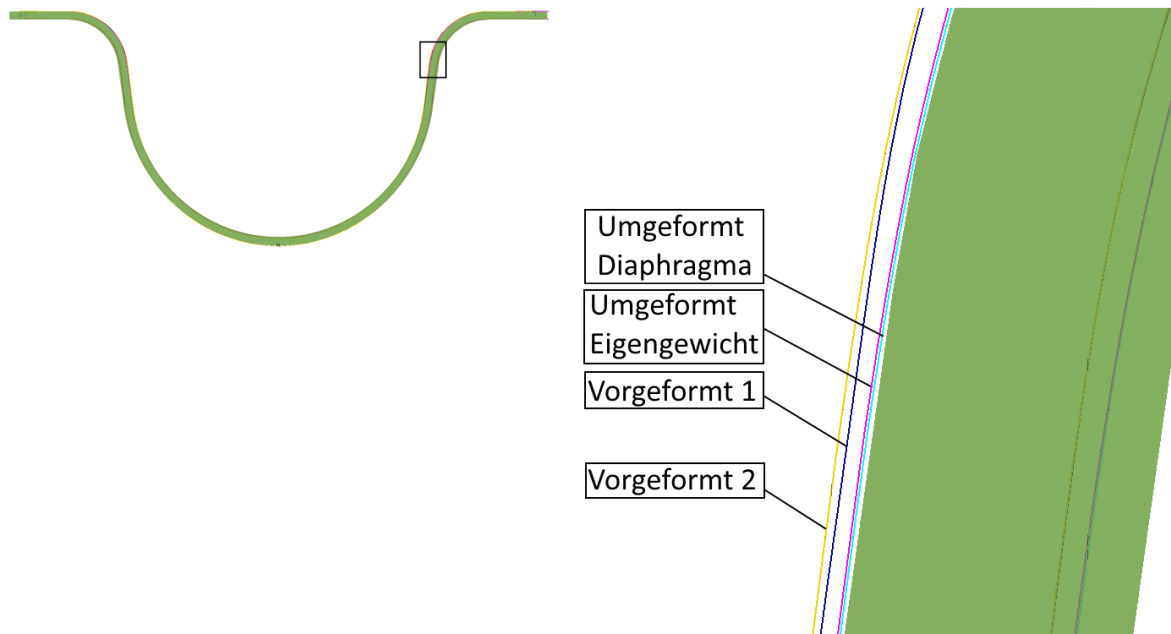


Abbildung 38 Schnittansicht des Soll-Ist-Vergleichs aller Zwei-Folien-Lamine und dem CAD-Modell

Abbildung 39 Ausschnitt des rechten Winkels der Schnittansicht des Soll-Ist-Vergleichs aller Zwei-Folien-Lamine und dem CAD-Modell

Tabelle 13 Radien der gefitteten Zylinder auf den Zwei-Folien-Laminaten

Bauteil	Radius klein		Radius groß
	Links	Rechts	
CAD-Soll	13 mm	13 mm	38,24 mm
Vorgeformte Folie 1	13,00 mm	12,86 mm	38,07 mm
Vorgeformte Folie 2	13,08 mm	13,01 mm	38,08 mm
Umgeformt durch Eigengewicht	13,17 mm	13,15 mm	38,19 mm
Umgeformt durch Diaphragma	13,21 mm	13,09 mm	38,22 mm

4.2.4 Eigenspannungsanalyse

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, soll in diesem Kapitel der innere Spannungszustand der Proben genauer analysiert werden. Insgesamt werden vier Bauteile untersucht, zwei Bauteile des Bi-Metall-Aufbaus und zwei Bauteile des Zwei-Folien-Aufbaus. Von jeder Aufbauweise wird ein Bauteil mit vorgeformter und ein Bauteil ohne vorgeformte Folie untersucht.

Jede Probe wird eingangs mittels des ATOS-Messsystems vermessen. Anschließend werden die Metallfolien entfernt und das Bauteil wird erneut vermessen.

Es wird angenommen, dass eingelagerte Eigenspannungen im Bauteil durch das Entfernen der Folie frei werden und sich das Bauteil deformiert. Es wird ein Spring-In-Effekt ähnlich dem der CFK-Referenz erwartet. Die Bestimmung des Öffnungswinkels erfolgt erneut über das Fitten von Ebenen an den Schenkeln.

In Tabelle 14 sind die gemessenen Werte für die Winkelöffnung dargestellt. Die Werte vor dem Entfernen der Folie decken sich mit den Messwerten aus den vorangegangenen Kapiteln. Kleinere Abweichungen können hierbei durch das händische Fitten der Ebenen begründet werden.

Bei den Bi-Metall-Aufbauten ist zu erkennen, dass die Winkel nach dem Entfernen der Folie stark einfallen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der CFK-Anteil des Bi-Metall-Aufbaus als symmetrisch-antimetrisches Laminat gestaltet ist, genau wie die CFK-Referenz. Das Entfernen der Folie an der Außenseite überführt das unsymmetrische Laminat, welches den Bi-Metall-Effekt aufweist, in ein symmetrisch-antimetrisches Laminat. Die durch die Folie eingelagerten Eigenspannungen werden, wie eingangs angenommen, frei und das Laminat verhält sich ähnlich der CFK-Referenz und zeigt einen Spring-In-Effekt auf. Die Referenz weist einen Winkel von $13,924^\circ$, während die Bauteile nach dem Entfernen der Folie Winkel von $13,54^\circ$ und $13,70^\circ$ aufweisen. Die Abweichungen sind zum einen durch einen gewissen händischen Messfehler zu begründen und zum anderen dadurch, dass beim Abziehen der Folien teilweise Lagen beschädigt oder komplett abgezogen wurden. Außerdem ist die Oberfläche des Bauteils nach dem Abziehen ungleichmäßiger geworden, sodass zum Teil Fasern abstehen und das Ergebnis leicht verfälschen können.

Dadurch, dass die Winkel nach dem Entfernen der Folie eine geringe Abweichung aufzeigen und das Δ des durch Eigengewicht des Werkzeugs umgeformten Bauteils größer ist, ist darauf zu schließen, dass in diesem Bauteil höhere Eigenspannungen eingelagert waren. Dies deckt sich mit der Vermutung, dass die Rückstellkraft der nicht vorgeformten Folien höhere Eigenspannungen im Bauteil verursacht.

Abbildung 40 und Abbildung 41 zeigen die Bauteile nach dem Entfernen der Folien. Während die Folie in Abbildung 40 weiterhin die Omega-Form aufweist, ist die Folie in Abbildung 41 im Bereich des großen Radius fast vollständig in die Ausgangsform zurückgegangen. Abweichungen der Originalformen können zum einen während des Abziehens entstanden sein und zum anderen durch die an der Folie angehafteten CFK-Schichten, die beim Abziehen gemeinsam entfernt wurden. Die 13 mm Radien sind nach dem Entfernen der Folien sowohl in der vorgeformten Folie als auch in der nicht vorgeformten Folie noch gut zu erkennen und nicht in die ursprüngliche Form zurückgegangen. Dies ist damit zu erklären, dass die Folie an dieser Stelle größere Fließspannungen während des Umformprozesses erfahren hat, was zu einer plastischen Deformation geführt hat.

Die Zwei-Folien-Bauteile verhalten sich ähnlich. Nach dem Entfernen der Folie weisen die Bauteile einen ähnlichen Winkel von weniger als 16° auf. Die Abweichung von $0,55^\circ$ zwischen den Bauteilen mit abgezogener Folie ist erneut durch die raue Oberfläche mit abstehenden Fasern und den dadurch entstehenden Messfehler zu begründen.

Wie bei den Bi-Metall-Aufbauten ist bei den Zwei-Folien-Aufbauten das Δ des durch das Eigengewicht des Werkzeugs umgeformten Bauteils größer als das des Bauteils mit

vorgeformter Folie. Dies lässt erneut darauf schließen, dass die nicht vorgeformte Folie größere Eigenspannungen im Bauteil einlagert als die vorgeformte Folie. Der Winkel des Bauteils mit vorgeformter Folie weitet nach dem Entfernen der Folie um $0,2^\circ$. Diese Abweichung entspricht nicht dem erwarteten Ergebnis. Der Wert von $0,2^\circ$ ist jedoch so gering, dass dies durch den Messfehler des händischen Fittens der Ebenen und der rauen Oberfläche mit abstehenden Fasern zu begründen ist.

Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen die Zwei-Folien-Aufbauten nach dem Entfernen der Folien. Die muldenseitigen Folien zeigen ein ähnliches Bild wie die entfernten Folien der Bi-Metall-Aufbauten. Die nicht vorgeformte Folie geht im Bereich des großen Radius fast vollständig in die ursprüngliche ebene Form zurück, während die kleinen Radien erhalten bleiben. Die Deformation der stempelseitigen Folie sind durch die hohen aufgewendeten Kräfte beim Entfernen der Folie zu erklären.

Tabelle 14 Öffnungswinkel der Schenkel vor und nach dem Entfernen der Metallfolien für die Bi-Metall- und die Zwei-Folien-Aufbauten

Bauteil		CAD	Bi-Metall-Aufbau		Zwei-Folien-Aufbau	
		Soll	Vorgeformt	Eigengewicht	Vorgeformt	Eigengewicht
Winkel	Vorher	16°	$26,76^\circ$	$28,36^\circ$	$14,24^\circ$	$16,29^\circ$
	Nachher	16°	$13,54^\circ$	$13,70^\circ$	$14,44^\circ$	$14,99^\circ$
	Δ	-	$-13,22^\circ$	$-14,66^\circ$	$0,20^\circ$	$-1,3^\circ$

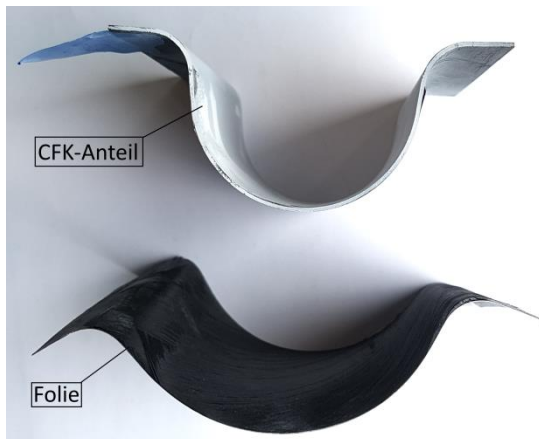


Abbildung 40 Bi-Metall-Aufbau mit vorgeformter Folie nach entfernen der Folie



Abbildung 41 Bi-Metall-Aufbau durch Eigengewicht des Werkzeugs umgeformt nach entfernen der Folie

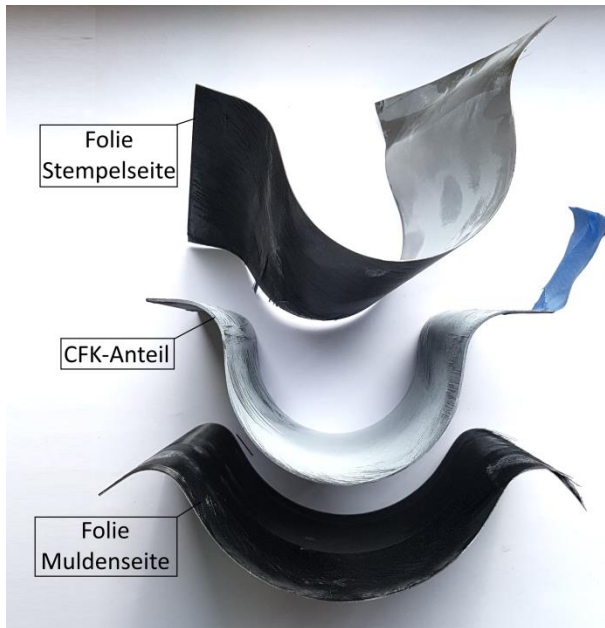


Abbildung 42 Zwei-Folien-Aufbau mit vorgeformter Folie nach entfernen der Folie

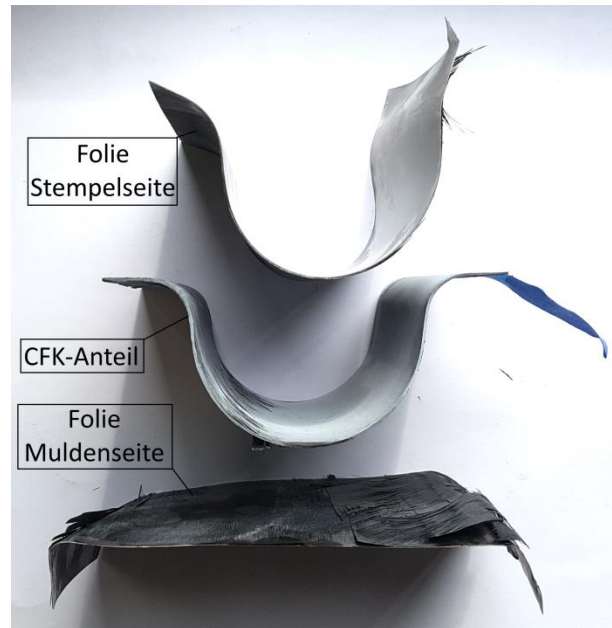


Abbildung 43 Zwei-Folien-Aufbau durch Eigengewicht des Werkzeugs umgeformt nach entfernen der Folie

4.3 Bewertung und Zusammenfassung der Ergebnisse

Die untersuchten Verfahren können Anhand der Ergebnisse bezüglich verschiedener Kriterien bewertet werden.

Die geringsten Abweichungen zur CAD-Soll-Geometrie zeigen die Verfahren, bei denen der gesamte Stack in einem Schritt umgeformt wird. Dies ist bei den symmetrischen Zwei-Folien-Aufbauten in Kapitel 4.2.3 sehr gut zu erkennen.

Diese Bauteile weisen jedoch im Vergleich zu den Bauteilen mit vorgeformten Metallfolien größere Eigenspannungen auf, was in Kapitel 4.2.4 genauer erläutert wird. Höhere Eigenspannungen haben eine geringere Tragfähigkeit zur Folge und können dadurch ein limitierender Faktor in der Auslegung von Bauteilen sein.

Aus Fertigungssicht ist der Vorbereitungsaufwand für das Umformen durch das Eigengewicht des Werkzeugs und für das Umformen über das Vakuumdiaphragma geringer als das Vorformen der Folien. Die Vorbehandlung der Stahlfolien gestaltet sich durch die ebene Geometrie einfacher, genau wie das Aufbauen der Lamine. Das Schließen des Werkzeugs ist durch die großen Rückstellkräfte jedoch schwieriger, sodass Hilfsmittel wie Schraubzwingen verwendet werden müssen, um das Werkzeug vollständig zu schließen. Gleichzeitig wird das Kleben des Korkrandes erschwert, da die Bauteile nicht vollständig am Werkzeug anliegen und die genaue Bauteilkante nicht erkennbar ist.

Durch das Vorformen der Metallfolien ist der Aufwand der Vorbereitung höher, da das Biegen der Folien in die gewünschte Form zeitintensiv ist. Das Entfernen der Oxidschicht muss wegen der Geometrie durch einen händischen Sandstrahlprozess erfolgen und kann nicht wie zuvor automatisiert erfolgen. Das Aufbauen des gesamten Stacks ist ebenfalls aufwändiger, da der CFK-Anteil des Laminats zusätzlich durch das Diaphragma in Form gebracht werden muss. Das Schließen des Werkzeugs und das Einbringen des Korkrandes

ist im Vergleich zu den Verfahren, in denen die Folien nicht vorgeformt werden, einfacher, da die Bauteile vor dem Schließen der Form schon vollständig in Form gebracht sind.

Die oben genannten Kriterien führen dazu, dass die Auswahl des Fertigungsprozesses vom jeweiligen Anwendungsfall abhängt und die Vor- und Nachteile jedes Verfahrens vor der Auswahl abgewogen werden müssen.

5 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Erarbeitung von Konzepten zur Integration gekrümmter Leiterbahnen in Faserverbundaufbauten. Hierzu wurden drei Konzepte entwickelt und untersucht. Das erste Konzept betrachtete das Vorformen der Folien vor dem Einlegen in das Werkzeug und zwei weitere Konzepte betrachteten das Umformen von Prepreg-Lagen und der Folie gemeinsam in einem Schritt. Dieses gemeinsame Umformen erfolgte einmal über ein Vakuumdiaphragma und einmal über das Eigengewicht des Werkzeugs. Als Testbauteile dienten hierzu Bauteile in Omega-Form.

Es wurde dabei untersucht, welche Form von Eigenspannungen durch Effekte wie den Spring-In-Effekt, den Bi-Metall-Effekt und die Rückstellkraft in die Bauteile eingebracht wurden und wie diese Effekte sich auf die Endkontur der Bauteile auswirkten. Hauptaugenmerk wurde auf die Rückstellkraft der vorgeformten Metallfolien im Vergleich zu den nicht vorgeformten gelegt und ob die Art der Umformung Einfluss auf das Ausmaß der Verformung der Endgeometrie hat.

Dafür wurden drei verschiedene Lagenaufbauten erarbeitet, die die aufgetretenen Effekte möglichst isolieren sollten. Die Folienanzahl in den jeweiligen Bauteilen variierte zwischen null und zwei Lagen pro Aufbau.

Zusätzlich musste noch ein Verfahren zur Umformung der Metallfolien ausgewählt werden und es wurde sich nach mehreren Auswahlkriterien und Expertengesprächen für das Biegen von Hand entschieden. Das vorhandene Werkzeug zur Herstellung der Omega-Profile in einem Heißpressverfahren wurde für die erarbeiteten Umformmethoden modifiziert.

Als Ergebnis konnte gezeigt werden, dass das Vorformen der Folie Einfluss auf die Eigenspannung im Bauteil und damit auf die Endkontur besitzt.

Bei den Bauteilen, die einen Bi-Metall-Aufbau besaßen und deren Folien nicht vorgeformt wurden, wurde nachgewiesen, dass die Schenkel des Omegas durch die Überlagerung von Rückstellkraft und Bi-Metalleffekt weiter nach außen gedrückt werden als die Schenkel der Bauteile mit vorgeformten Folien. Diese Verformung lässt auf größere Eigenspannungen im Bauteil schließen, die durch einen Test, bei dem die Metallfolie entfernt wurde, nachgewiesen werden konnten.

Die Bauteile, die einen symmetrischen Aufbau mit zwei Metallfolien besaßen, die nicht vorgeformt wurden, zeigten eine Überlagerung von Rückstellkraft der Folien und dem Spring-In-Effekt, sodass sich diese geometrisch ausgeglichen haben und diese Bauteile nur geringe Abweichungen von der Sollkontur zeigten. Auch bei diesen Bauteilen konnten größere Eigenspannungen in den Bauteilen mit nicht vorgeformten Folien nachgewiesen werden.

6 Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Vorformen der Folien einen Einfluss auf den inneren Spannungszustand der Bauteile hat. Besonders in Hinsicht auf die Überlagerung von Spring-In und der Rückstellkraft der Metallfolien in den Zwei-Folien-Aufbauten wäre es interessant zu untersuchen, wie sich der innere Spannungszustand genau ändert. Dies könnte beispielsweise über Zugversuche realisiert werden.

Eine weiterführende Untersuchung wäre in Hinsicht auf den Ausgleich des Spring-In-Effekts durch den Metallanteil und den Grad der Umformung der Folien interessant. Wenn es möglich wäre, durch die Einstellung bestimmter Parameter im Metall den Spring-In vollständig auszugleichen, könnten dadurch die Formtreue und Bauteilgüte durch die Verwendung von FMLs verbessert werden. Hierbei müssen nur die induzierten Eigenspannungen wie oben erwähnt genauer betrachtet werden.

Ein weiterer Punkt ist die Wahl der Metallfolien. Die bis jetzt ausschließlich verwendete 1.4310 Legierung ist durch ihre Federstahleigenschaften nicht optimal für Umformprozesse geeignet und nur mit sehr großem Aufwand umzuformen. Dies wird durch die geringe Folienstärke noch zusätzlich erschwert. Die Auswahl anderer Stahllegierungen, die von den Eigenschaften geringere Fließgrenzen und eine geringere elastische Dehnung besitzen, könnte gerade in Bezug auf komplexere Geometrien interessant sein. Jedoch müsste untersucht werden, welche Auswirkung die Verwendung einer anderen Metallfolie auf die spezifischen Eigenschaften des Materialverbundes hat.

Ein weiterer Aspekt ist die Untersuchung von sphärisch gekrümmten Geometrien wie Halbkugeln. Diese werden in vielen technischen Bereichen benötigt. Hierbei könnten jedoch andere Herausforderungen auftreten, die bei nicht gekrümmten oder einfach gekrümmten Bauteilen vernachlässigbar sind. Beim sphärischen Umformen einer einzelnen großen CFK-Lage kann es beispielsweise je nach Webart zur Faltenbildung kommen. Das Problem der Faltenbildung kann ebenso abhängig von der Geometrie und der Umformmethode beim Umformen der Metallfolie entstehen. Durch die sphärische Krümmung können während der Herstellung außerdem weitere faserverbundspezifische Effekte wie Warpage und Forced Interaction stärken Einfluss auf die induzierten Eigenspannungen haben. Nichtsdestotrotz bietet die Verwendung sphärisch gekrümmter Bauteile eine Vielzahl denkbarer Einsatzgebiete und sollte genauer untersucht werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] A. Vlot, *Fibre Metal Laminates - An Introduction*, Delft University of Technology: Springer-Science+Business Media, B.V., 2001.
- [2] R. Marissen, *PhD. Dissertation; Fatigue crack growth in ARALL- A hybrid aluminiumaramid composite material*, Delf University of Technology, 1988.
- [3] C. V. A. Hühne, *Korrosion in Verbindungsstellen bei CFK-Metall-Werkstoffen in der Luft und Raumfahrt*, Ulm, 2015.
- [4] A. E. B. M. Ö. C. O. Sinmazcelik T., *Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods*, Kocaeli University, Kocaeli, Turkey, 2011.
- [5] A. S. D. H. C. S. M. Viandier, *Hybridisation as an efficient joining, electrochemical corrosion study as a need*, Leuze Verlag, 2017.
- [6] D. Stefaniak, *Hybride Laminate*, 2016.
- [7] M. M. D. F. P. U. G. M. M. F. Tsartsaris N., *Low-velocity impact behaviour of fiber metal laminates*, Journal of Composite Materials, 2011.
- [8] D. T. Beumler, *Fiber Metal Laminate Structures- from Laboratory to Application*, Hamburg University of Applied Sciences, 2009.
- [9] E. K. B. K. C. H. D. Stefaniak, *Improving the mechanical performance of unidirectional CFRP by Metal-Hybridisation*, DLR Braunschweig, Germany, 2012.
- [10] B. H. L. F. A. Kolesnikov, „Improving composite bolted joints,“ *Elsevier, Composite Structures*, pp. 368-380, 2007.
- [11] A. C. P. A. J. P. E. O. A. Fink, „Hybrid CFRP/titanium bolted joints: Performance assessment and application to a spacecraft payload adaptor,“ *Elsevier, Composites Science and Technology*, pp. S. 368-380, 2009.
- [12] J. P. A. A. H. Nickel, *Demonstrator zur Leitungsintegration*, 2017.
- [13] G. F. Carolyne Albert, *Spring-in and warpage of angled composite laminates*, University of British Columbia, Vancouver Canada, 2001.
- [14] D. S. C. H. E. Kappel, *Process distortions in prepreg manufacturing – An experimental study on CFRP L-profiles*, DLR Braunschweig, Germany, 2013.
- [15] C. Hühne, *Vorlesung: Grundlagen der Faserverbundfertigung*, Technische Universität Braunschweig, 2018.
- [16] S. Wijskamp, *Shape distortions in composite forming*, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2005.
- [17] S. Timoshenko, *Analysis of bi-metal thermostats*, Journal of the Optical Society of America, 1925.
- [18] G. S. A. Herbert Fritz, *Fertigungstechnik*, Berlin: Springer Verlag, 2007.

- [19] J. F. K.-H. Grote, *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau* 22. Auflage, Berlin: Springer, 2007.
- [20] „Wikipedia,“ 4 3 2016. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Walzrunden>. [Zugriff am 28 05 2019].
- [21] P. S. D. Weise, *Inkrementelles Blechumformen - Perspektiventechologie*, Fraunhofer Institut.
- [22] U. Reißmann, Interviewee, *Expertengespräch*. [Interview]. 15 5 2019.
- [23] M. Albrecht, *Pilotstudie zum Hotforming von Hochleistungsfaserverbundprofilen*, Braunschweig, 2017.

Anhang A

Datenblatt des Prepreg HexPly 8552 mit Fasertyp AS4



HexPly® 8552
Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Description

HexPly® 8552 is a high performance tough epoxy matrix for use in primary aerospace structures. It exhibits good impact resistance and damage tolerance for a wide range of applications.

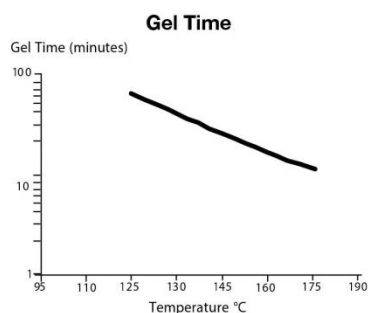
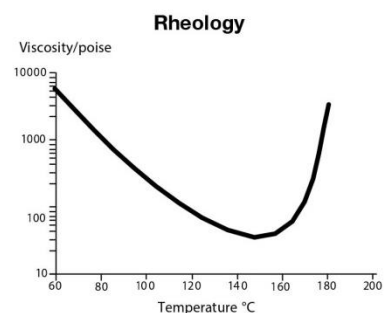
HexPly® 8552 is an amine cured, toughened epoxy resin system supplied with unidirectional or woven carbon or glass fibres.

HexPly® 8552 was developed as a controlled flow system to operate in environments up to 121°C (250°F).

Benefits and Features

- Toughened epoxy matrix with excellent mechanical properties
- Elevated temperature performance
- Good translation of fibre properties
- Controlled matrix flow in processing
- Available on various reinforcements
- Excellent drape and tack

Resin Matrix Properties





HexPly® 8552
Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Prepreg Properties - HexPly® 8552 UD Carbon Prepregs

Physical Properties

	Units	AS4	IM7
Fibre Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.79 (0.065)	1.77 (0.064)
Filament count/tow		12K	12K
Resin density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.30 (0.047)	1.30 (0.047)
Nominal Cured Ply Thickness 8552 /35%/134	mm (inch)	0.130 (0.0051)	0.131 (0.0052)
Nominal Fibre Volume	%	57.42	57.70
Nominal Laminate Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.58 (0.057)	1.57 (0.057)

Mechanical Properties

Test	Units	Temp °C (°F)	Condition	AS4	IM7
0°Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	1903 (267)	2572 (373)
		25 (77)	Dry	2207 (320)	2724 (395)
		91 (195)	Dry	–	2538 (368)*
90°Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	–	174 (25.3)
		25 (77)	Dry	81 (11.7)	64 (9.3)
		93 (200)	Dry	75 (10.9)	92 (13.3)*
0°Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	134 (19.4)	163 (23.7)
		25 (77)	Dry	141 (20.5)	164 (23.8)
		91 (195)	Dry	–	163 (23.7)*
90°Tensile Modulus	GPa (msi)	–	–	–	–
		25 (77)	Dry	10 (1.39)	12 (1.7)
		93 (200)	Dry	8 (1.22)	10 (1.5)*
0°Compression Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	1586 (230)	–
		25 (77)	Dry	1531 (222)	1690 (245)
		91 (195)	Dry	1296 (184)	1483 (215)
0°Compression Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	124 (18)	–
		25 (77)	Dry	128 (18.6)	150 (21.7)
		91 (195)	Dry	122 (17.7)	162 (23.5)
0° ILSS (Shortbeam shear)	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	164 (23.8)	–
		25 (77)	Dry	128 (18.5)	137(19.9)
		91 (195)	Dry	122 (14.7)	94 (13.6)*
		25 (77)	Wet	117 (16.9)	115 (16.7)
		71 (160)	Wet	84 (12.2)	80 (11.6)**
		91 (195)	Wet	78 (11.3)	–
In-plane Shear Strength	MPa (ksi)	25 (77)	Dry	114 (16.6)	120 (17.4)
		93 (200)	Dry	105 (15.2)	106 (15.4)*

Bold 93°C (200°F) Bold* 104°C (220°F) Bold 82°C (180°F)**



HexPly® 8552
Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Prepreg Properties - HexPly® 8552 Woven Carbon Prepregs (AS4 Fibre)

Physical Properties

	Units	AGP193-PW	AGP 280-5H
Fibre Type	–	AS4 3K	AS4 3K
Fibre density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.77 (0.065)	1.77 (0.065)
Weave	–	Plain	5HS
Mass	g/m ² (oz/yd ²)	193 (5.69)	286 (8.44)
Weight Ratio, Warp : Fill		50 :50	50 :50
Nominal cured ply thickness @ 37% resin content	mm (inch)	0.195 (0.0076)	0.289 (0.0114)
Nominal Fibre Volume	%	55.29	55.29
Nominal Laminate Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.57 (0.057)	1.57 (0.057)

Mechanical Properties

Test	Units	Temp°C (°F)	Condition	AGP193-PW	AGP280- 5H
0°Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	766 (111)	828 (120)
		25 (77)	Dry	828 (120)	876 (127)
		91 (195)	Dry	–	903 (131)
90°Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	710 (103)	752 (109)
		25 (77)	Dry	793 (115)	800 (116)
		93 (200)	Dry	759 (110)	772 (112)
0°Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	66 (9.5)	70 (10.2)
		25 (77)	Dry	68 (9.8)	67 (9.7)
		91 (195)	Dry	–	69 (10)
90°Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	66 (9.6)	67 (9.7)
		25 (77)	Dry	66 (9.5)	66 (9.5)
		93 (200)	Dry	68 (9.8)	65 (9.4)
0°Compression Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	959 (139)	–
		25 (77)	Dry	883 (128)	924 (134)
		91 (195)	Dry	759 (110)	752 (109)
0°Compression Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	60 (8.7)	–
		25 (77)	Dry	60 (8.7)	64 (9.3)
		91 (195)	Dry	61 (8.8)	67(9.7)
0° ILSS (Shortbeam shear)	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	101 (14.6)	–
		25 (77)	Dry	84 (12.2)	79 (11.4)
		91 (195)	Dry	70 (10.2)	–
		-55 (-67)	Wet	75 (10.9)	69 (10)
		25 (77)	Wet	72 (10.4)	–
		91 (195)	Wet	59 (8.5)	–

Bold 93°C (200°F) Bold* 104°C (220°F) Bold 82°C (180°F)**



HexPly® 8552

Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Prepreg Properties - HexPly® 8552 Woven Carbon Prepregs (IM7 Fibre)

Physical Properties

	Units	SPG 196-P	SPG 370-8H
Fibre Type	–	IM7 6K	IM7 6K
Fibre density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.77 (0.064)	1.77 (0.064)
Weave	–	Plain	8HS
Mass	g/m ² (oz/yd ²)	196 (5.78)	374 (11.03)
Weight Ratio, Warp : Fill		50 :50	49 :51
Nominal cured ply thickness @ 37% resin content	mm (inch)	0.199 (0.0078)	0.380 (0.0150)
Nominal Fibre Volume	%	55.57	55.57
Nominal Laminate Density	g/cm ³ (lb/in ³)	1.56 (0.056)	1.56 (0.056)

Mechanical Properties

Test	Units	Temp°C (°F)	Condition	SPG 196-PW	SPG 370-SH
0° Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	979 (142)	965 (140)
		25 (77)	Dry	1090 (158)	1014 (147)
		91 (195)	Dry	–	–
90° Tensile Strength	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	862 (125)	903 (131)
		25 (77)	Dry	945 (137)	959 (139)
		93 (200)	Dry	979 (142)*	879 (130)*
0° Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	85 (12.3)	86 (12.5)
		25 (77)	Dry	85 (12.3)	86 (12.4)
		91 (195)	Dry	–	–
90° Tensile Modulus	GPa (msi)	-55 (-67)	Dry	80 (11.6)	81 (11.7)
		25 (77)	Dry	80 (11.6)	81 (11.7)
		93 (200)	Dry	79 (11.5)*	79 (11.5)*
0° ILSS (Shortbeam shear)	MPa (ksi)	-55 (-67)	Dry	–	–
		25 (77)	Dry	88 (12.7)	90 (13)
		91 (195)	Dry	69 (10)*	74 (10.8)*
		25 (77)	Wet	80 (11.6)	83 (12.1)
		71 (160)	Wet	61 (8.8)**	63 (9.1)**
		91 (195)	Wet	–	–

Bold 93°C (200°F) **Bold* 104°C (220°F)** **Bold** 82°C (180°F)**

Typical Neat Resin Data

Colour	Yellow	
Density	1.301 g/cc	(0.0470 lb/in ³)
Glass Transition Temperature, T _g dry	200°C	(392°F)
Glass Transition Temperature, T _g wet	154°C	(309°F)
Tensile Strength	121 MPa	(17.5 ksi)
Tensile Modulus	4670 MPa	(0.677 msi)

Copyright © 2016 – Hexcel Corporation – All Rights Reserved.

4


HexPly® 8552

Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Curing Conditions

Cure cycle for monolithic components

1. Apply full vacuum (1 bar).
2. Apply 7 bar gauge autoclave pressure.
3. Reduce the vacuum to a safety value of 0.2 bar when the autoclave pressure reaches approximately 1 bar gauge.
4. Heat at 1-3°C/min (2-8°F/min) to 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F)
5. Hold at 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F) for 60 minutes ± 5 minutes.
6. Heat at 1-3°C/min (2-8°F/min) to 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F)
7. Hold at 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F) for 120 minutes ± 5 minutes.
8. Cool at 2-5°C (4-9°F) per minute
9. Vent autoclave pressure when the component reaches 60°C (140°F) or below.

Cure cycle for honeycomb sandwich components

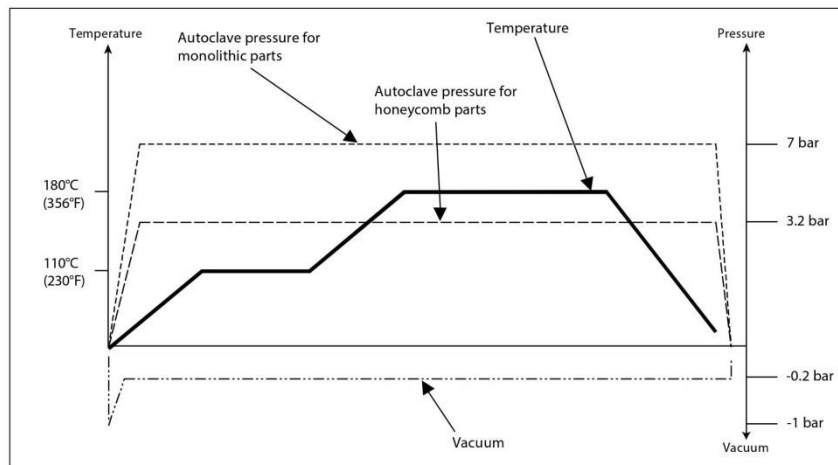
1. Apply full vacuum (1 bar).
2. Apply 3.2 bar gauge autoclave pressure.
3. Reduce the vacuum to a safety value of 0.2 bar when the autoclave pressure reaches approximately 1 bar gauge.
4. Heat at 1-3°C/min (2-8°F/min) to 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F)
5. Hold at 110°C ± 5°C (230°F ± 9°F) for 60 minutes ± 5 minutes.
6. Heat at 1-3°C/min (2-8°F/min) to 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F)
7. Hold at 180°C ± 5°C (356°F ± 9°F) for 120 minutes ± 5 minutes.
8. Cool at 2-5°C (4-9°F) per minute
9. Vent autoclave pressure when the component reaches 60°C (140°F) or below.

Note: For both cure cycles – at each stage, use the temperature shown by the leading thermocouple.

Heat-up rates are dependent on component thickness, eg, slow heat-up rates should be used for thicker components and large tools. Accurate temperature measurements of the component should be made during the cure cycles by using thermocouples.

Performance testing should accompany alternative cure cycles to ensure suitability for the particular application.

Curing Cycle for Honeycomb and Monolithic Components



Copyright © 2016 – Hexcel Corporation – All Rights Reserved.

5



HexPly® 8552

Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)



Product Data Sheet

Prepreg Storage Life

Tack Life:	10 days at RT (23°C/73°F)
Out Life:	30 days at RT (23°C/73°F)
Shelf Life:	12 months at -18°C(0°F) (from date of manufacture)

Definitions:

Shelf Life:	The maximum storage life for HexPly® Prepreg, upon receipt by the customer, when stored continuously, in a sealed moisture-proof bag, at -18°C(0°F). To accurately establish the exact expiry date, consult the box label.
Tack Life:	The time, at room temperature, during which prepreg retains enough tack for easy component lay-up.
Out Life:	The maximum accumulated time allowed at room temperature between removal from the freezer and cure.

Precautions for Use

The usual precautions when handling uncured synthetic resins and fine fibrous materials should be observed, and a Safety Data Sheet is available for this product. The use of clean disposable inert gloves provides protection for the operator and avoids contamination of material and components.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and industrial markets. Our comprehensive range includes:

- HexTow® carbon fibers
- HexFlow® RTM resins
- Acousti-Cap® sound attenuating honeycomb
- HexForce® reinforcements
- Redux® adhesives
- Engineered core
- HexPly® prepregs
- HexTool® tooling materials
- Engineered products
- HexMC® molding compounds
- HexWeb® honeycombs

For US quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please go to:

<http://www.hexcel.com/contact/salesoffice>

©2016 Hexcel Corporation – All rights reserved. Hexcel Corporation and its subsidiaries ("Hexcel") believe that the technical data and other information provided herein was materially accurate as of the date this document was issued. Hexcel reserves the right to update, revise or modify such technical data and information at any time. Any performance values provided are considered representative but do not and should not constitute a substitute for your own testing of the suitability of our products for your particular purpose. Hexcel makes no warranty or representation, express or implied, including but not limited to the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, and disclaims any liability arising out of or related to, the use of or reliance upon any of the technical data or information contained in this document.

FTA072AD16

Anhang B

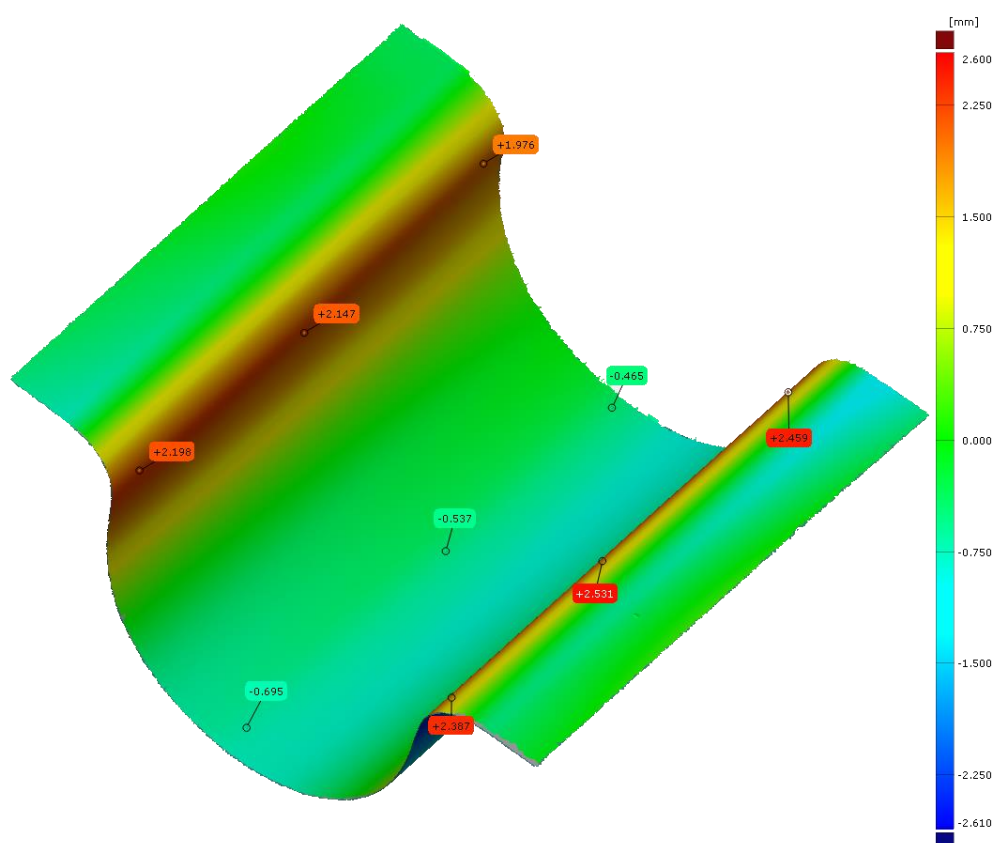


Abbildung 44 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 1 gegen das Muldenseiten CAD-Modell

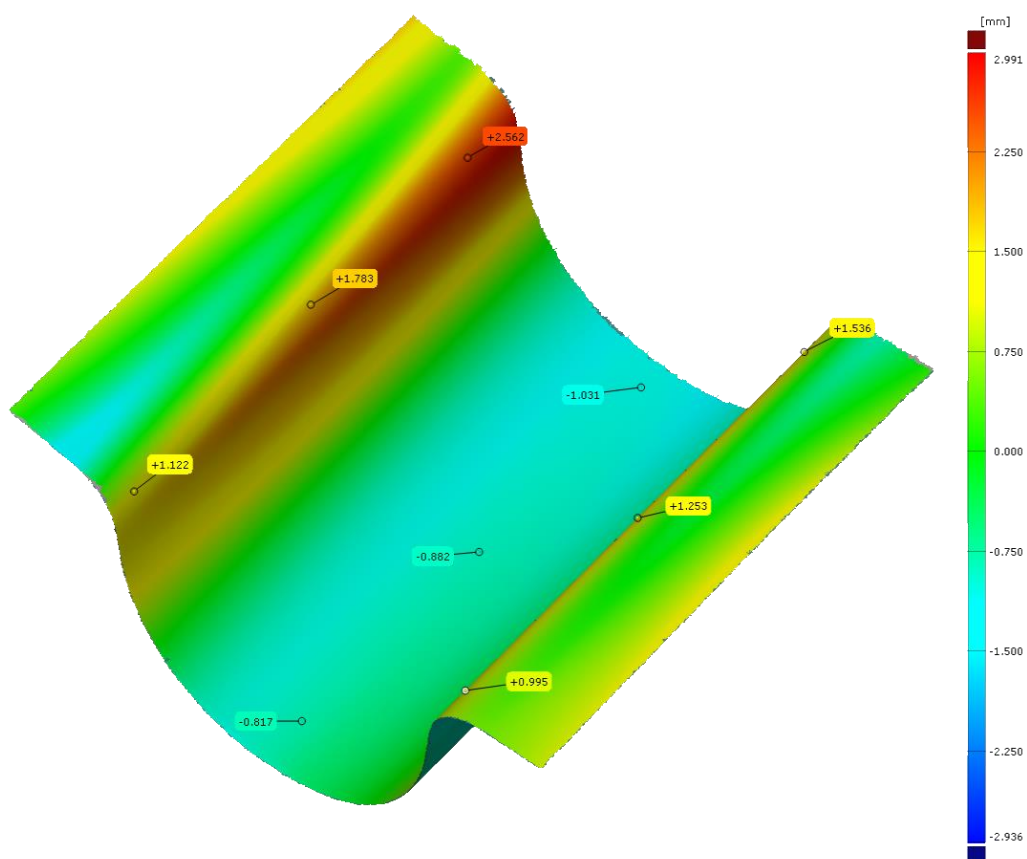


Abbildung 45 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 2 gegen das Muldenseiten CAD-Modell

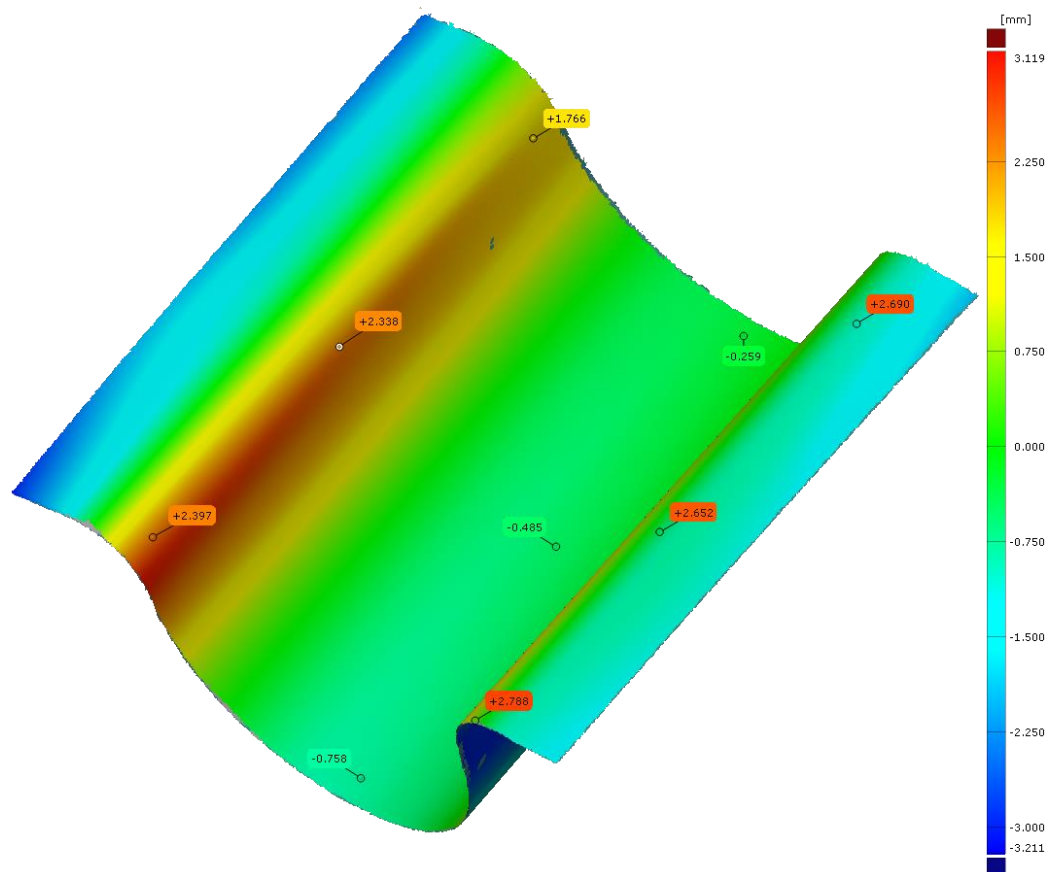


Abbildung 46 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 3 gegen das Muldenseiten CAD-Modell

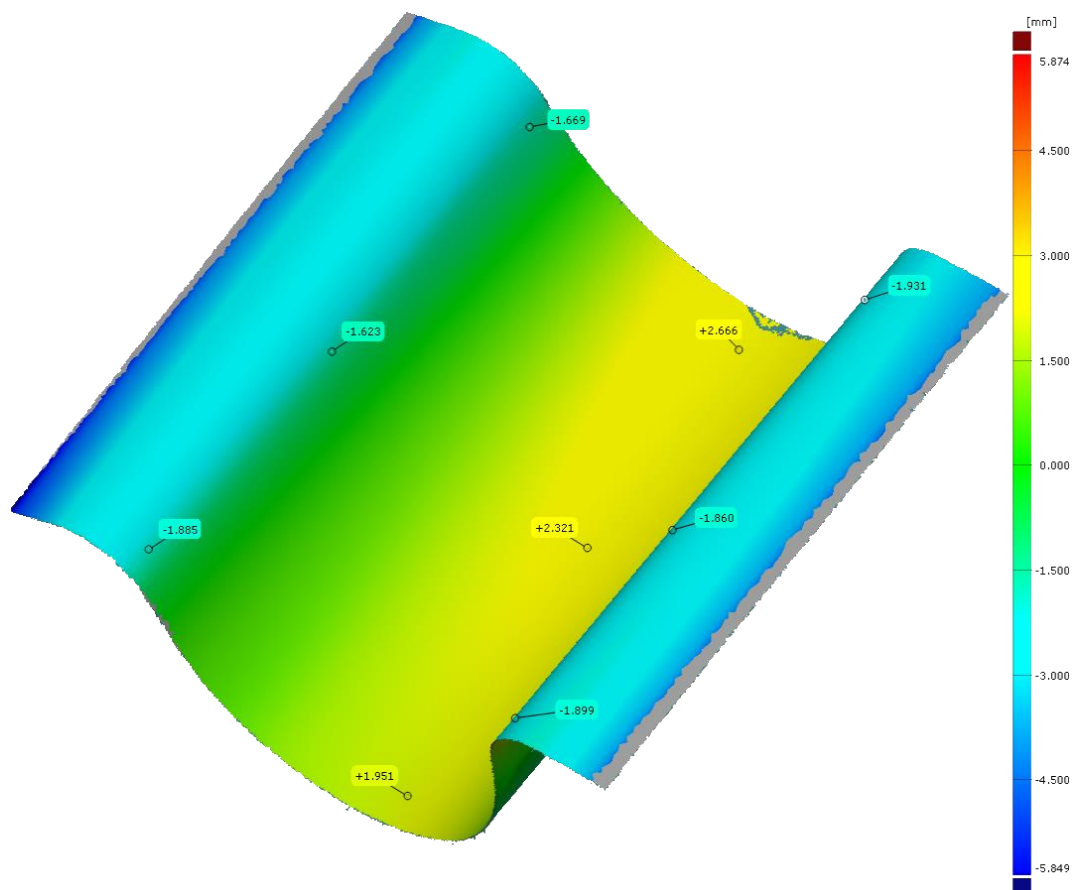


Abbildung 47 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 4 gegen das Muldenseiten CAD-Modell

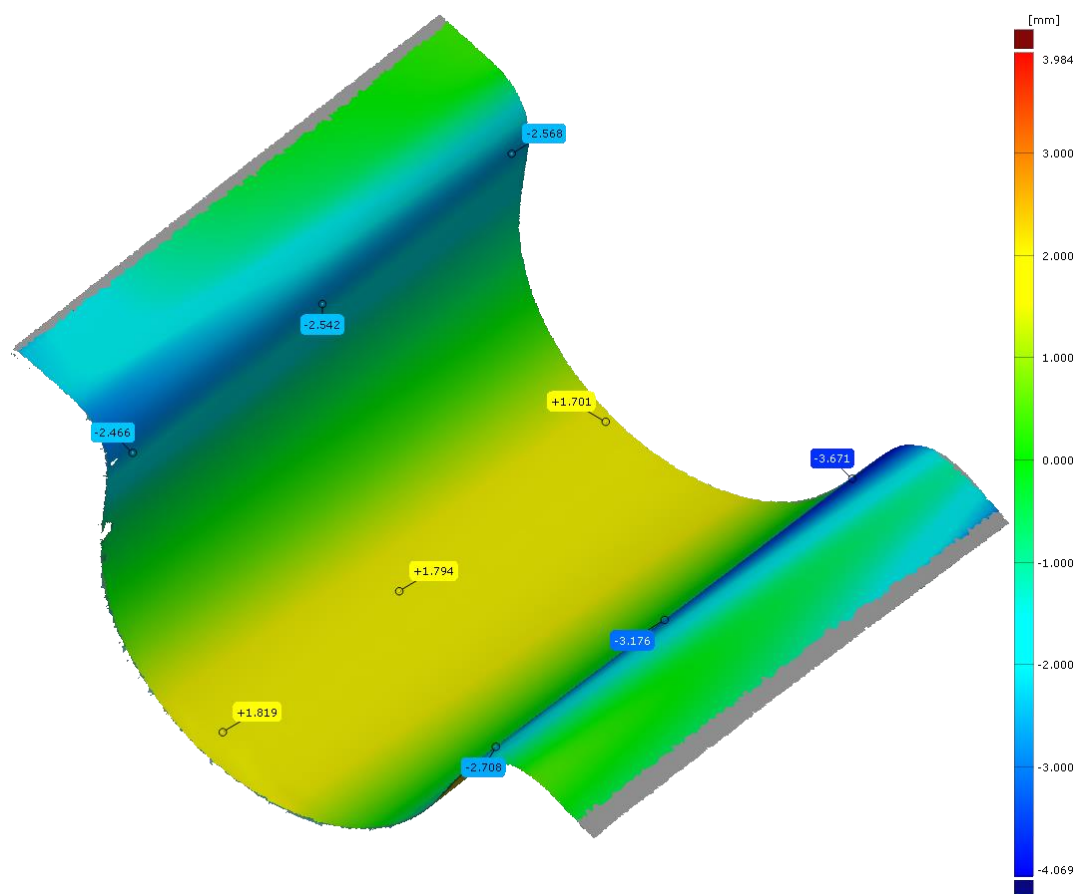


Abbildung 48 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 5 gegen das Muldenseiten CAD-Modell

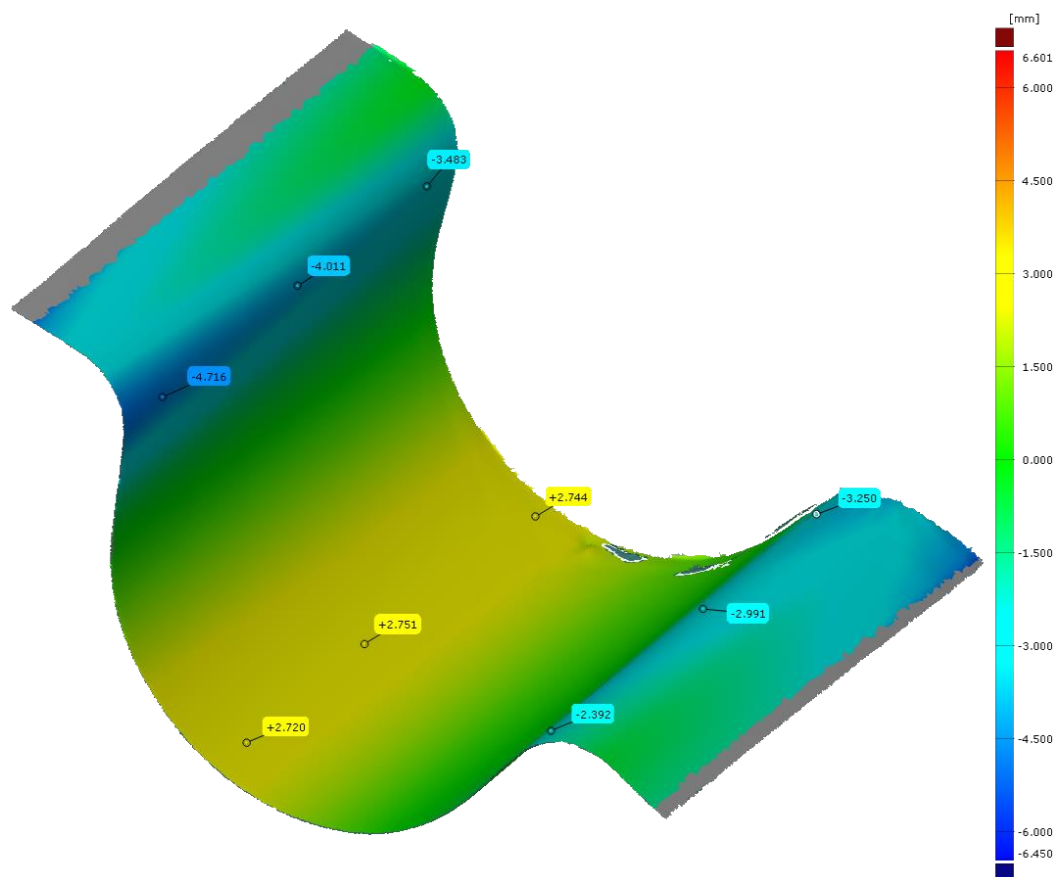


Abbildung 49 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 6 gegen das Muldenseiten CAD-Modell

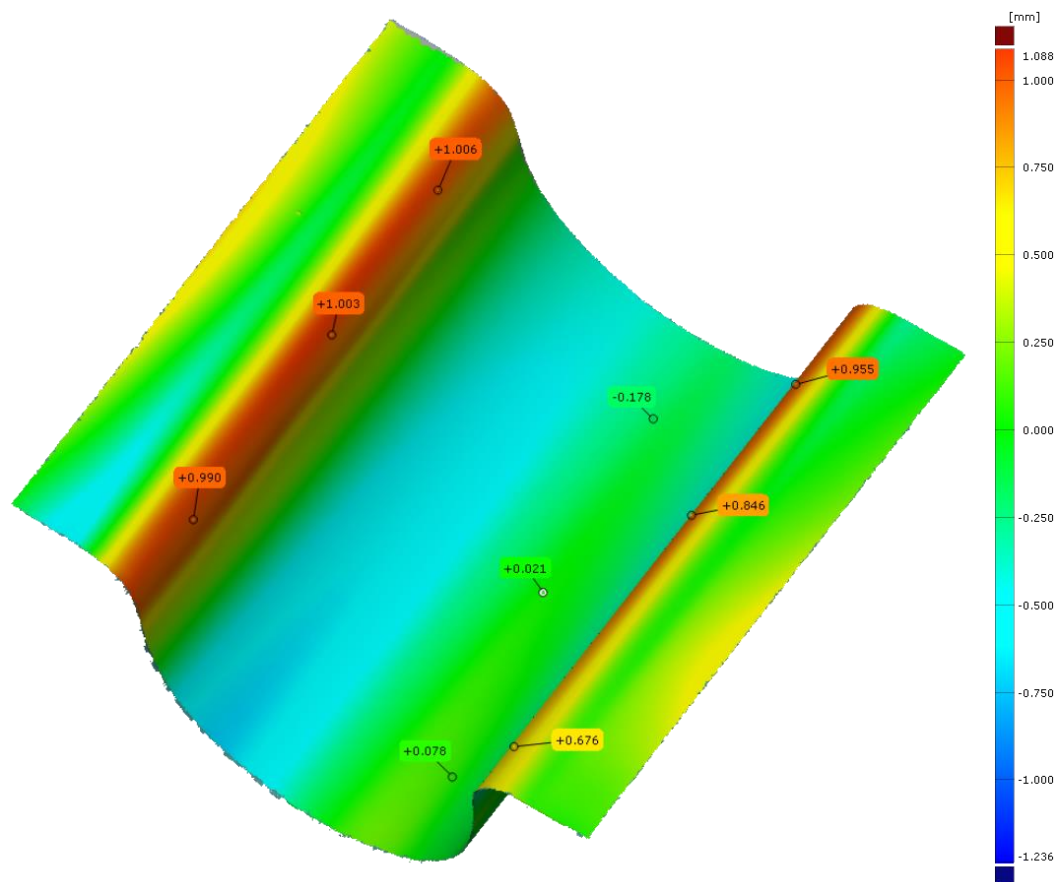


Abbildung 50 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 1 gegen das Stempelseiten-CAD-Modell

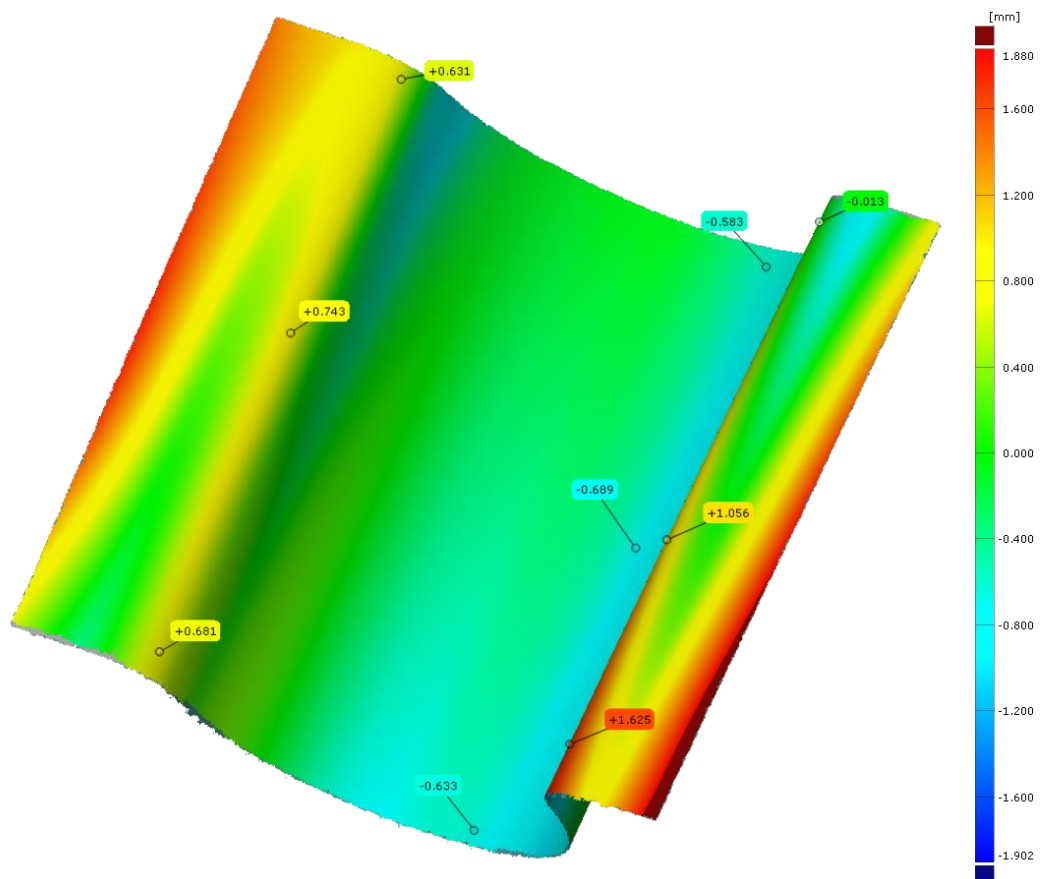


Abbildung 51 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 2 gegen das Stempelseiten-CAD-Modell

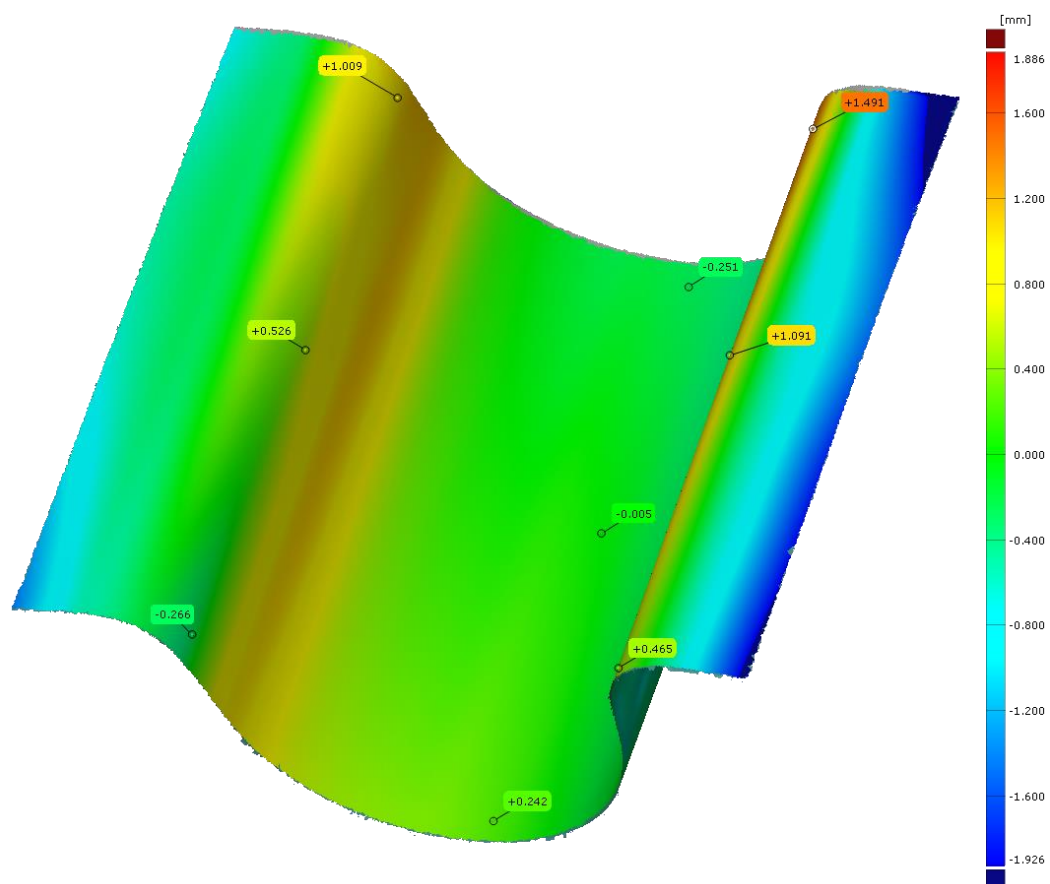


Abbildung 52 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 3 gegen das Stempelseiten-CAD-Modell

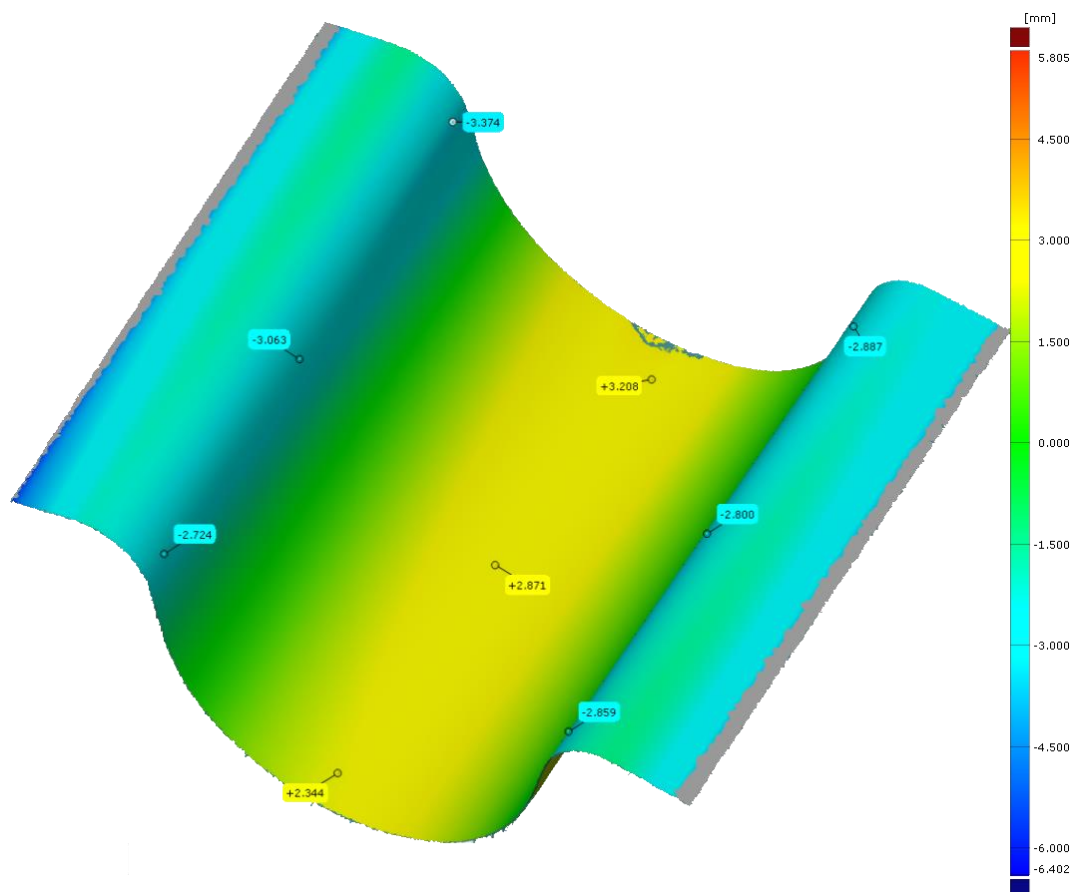


Abbildung 53 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 4 gegen das Stempelseiten-CAD-Modell

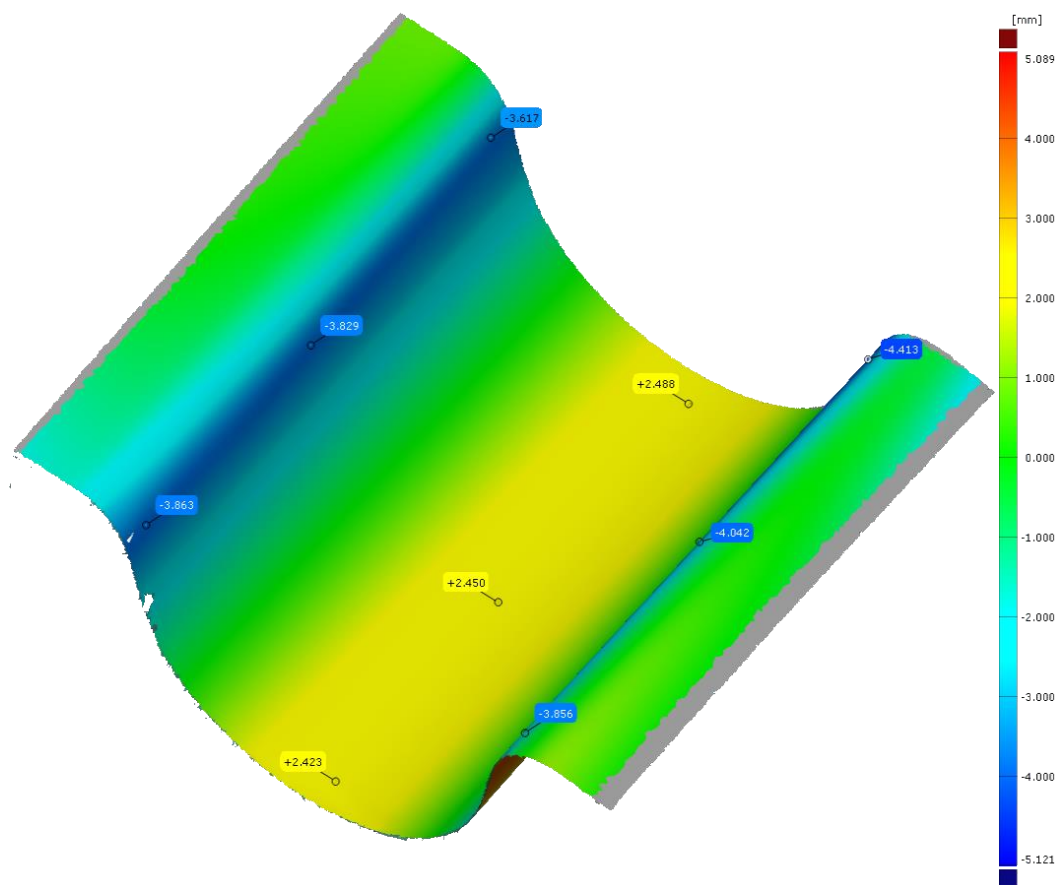


Abbildung 54 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 5 gegen das Stempelseiten-CAD-Modell

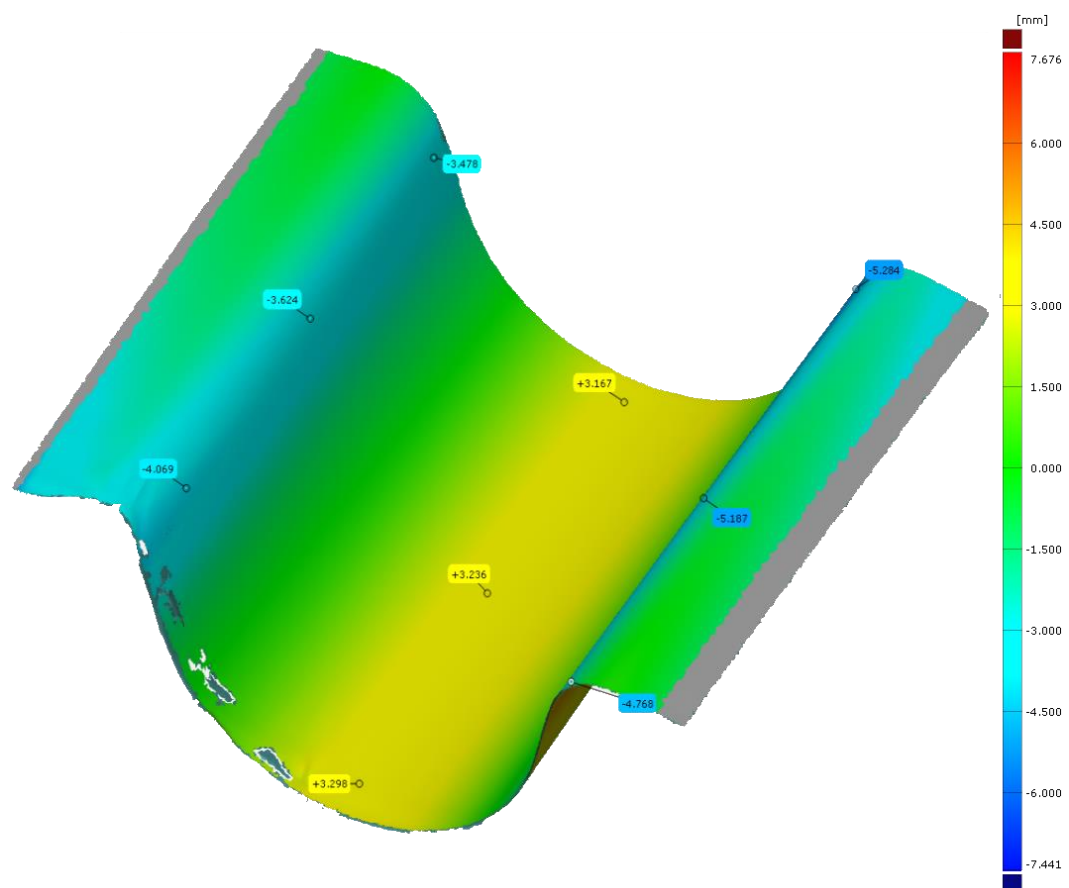


Abbildung 55 Abweichungsanalyse des vorgeformtes Blechs Nummer 6 gegen das Stempelseiten-CAD-Modell
XXII

Anhang C

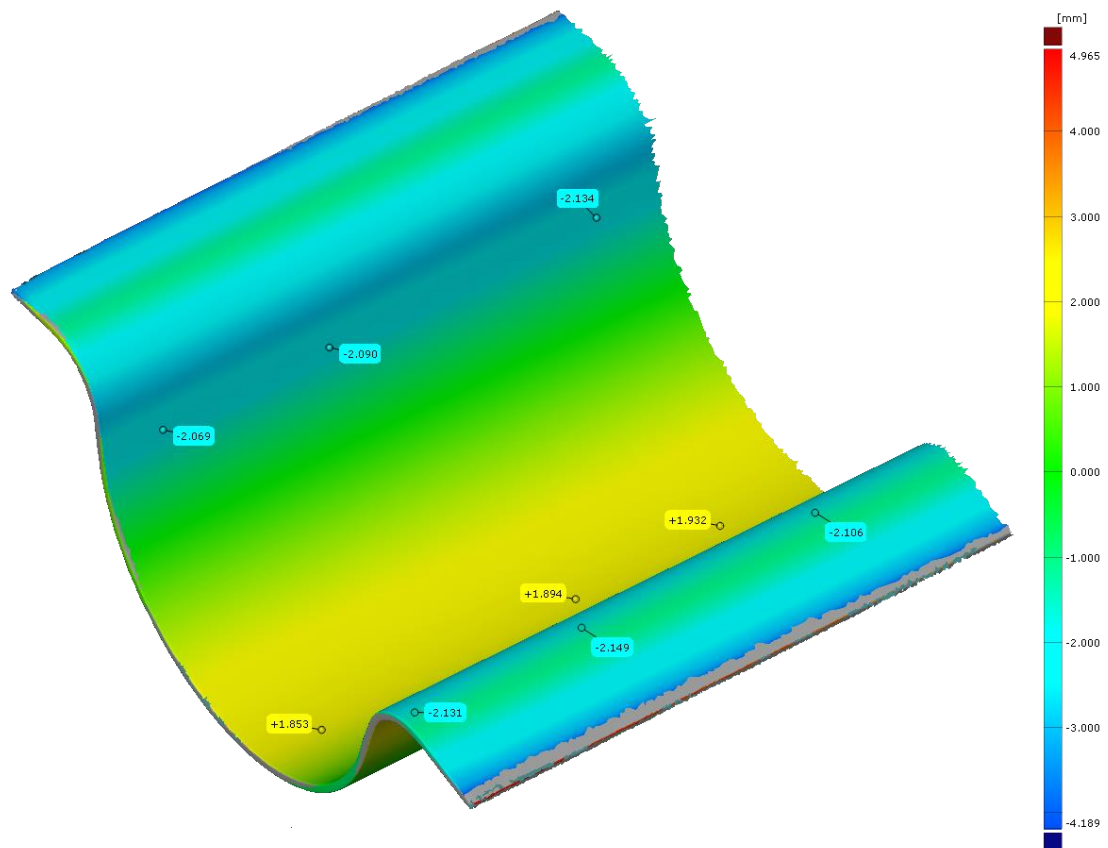


Abbildung 56 Abweichungsanalyse des Bi-Metall-Laminats 1 mit vorgeformter Folie gegen das CAD-Modell

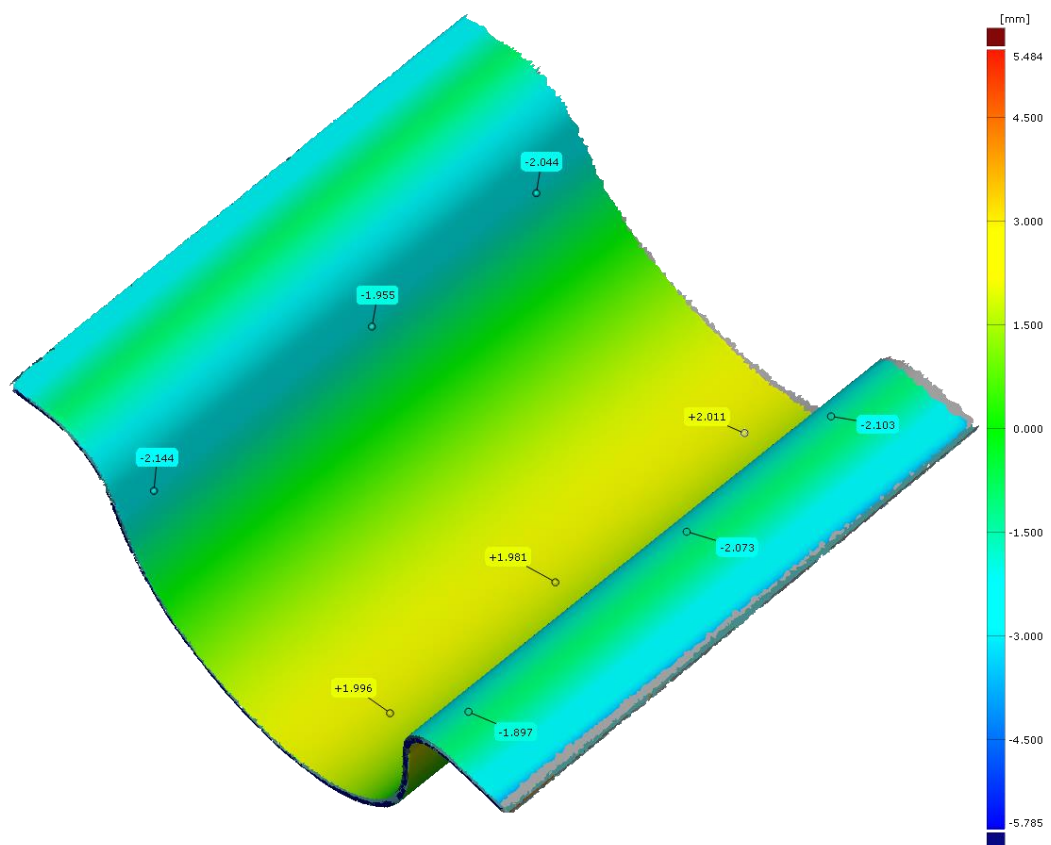


Abbildung 57 Abweichungsanalyse des Bi-Metall-Laminats 2 mit vorgeformter Folie gegen das CAD-Modell

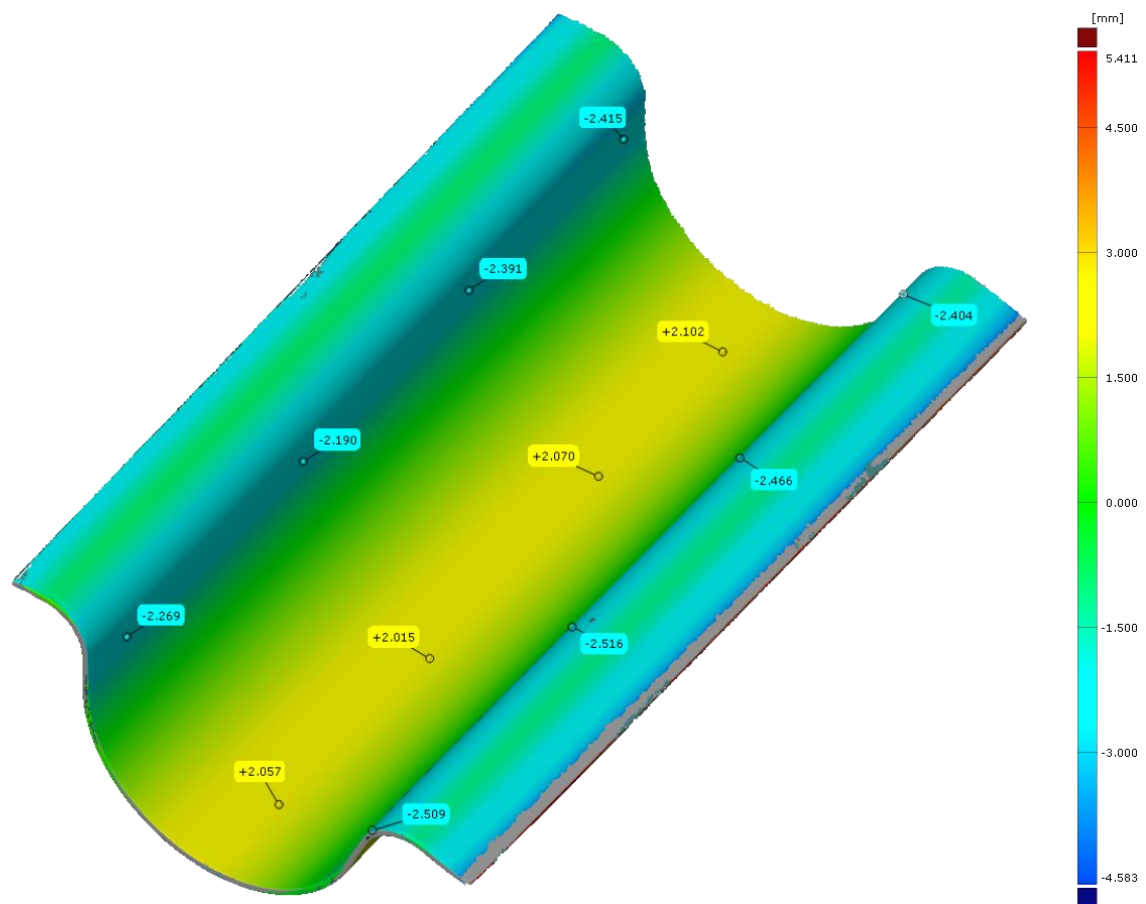


Abbildung 58 Abweichungsanalyse des Bi-Metall-Laminats umgeformt durch das Eigengewicht des Werkzeugs gegen das CAD-Modell

Anhang D

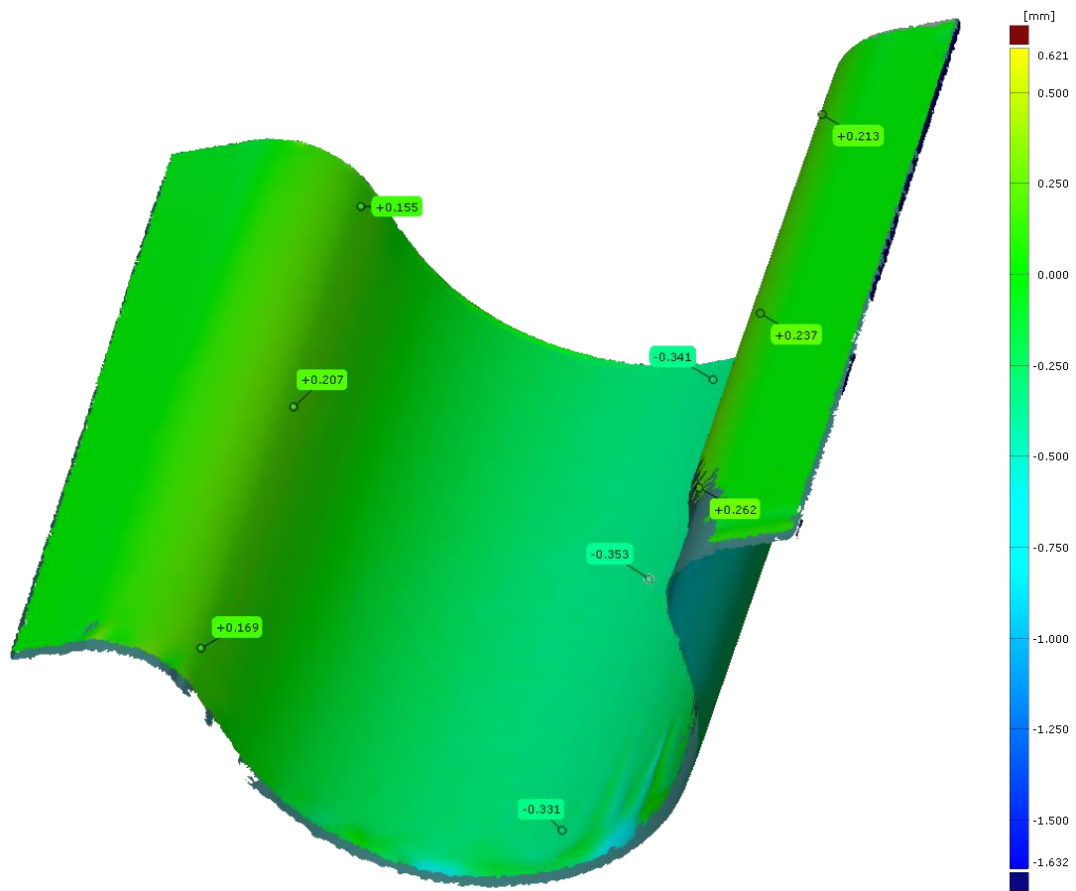


Abbildung 59 Abweichungsanalyse des Zwei-Folien-Laminats 1 mit vorgeformter Folie gegen das CAD-Modell

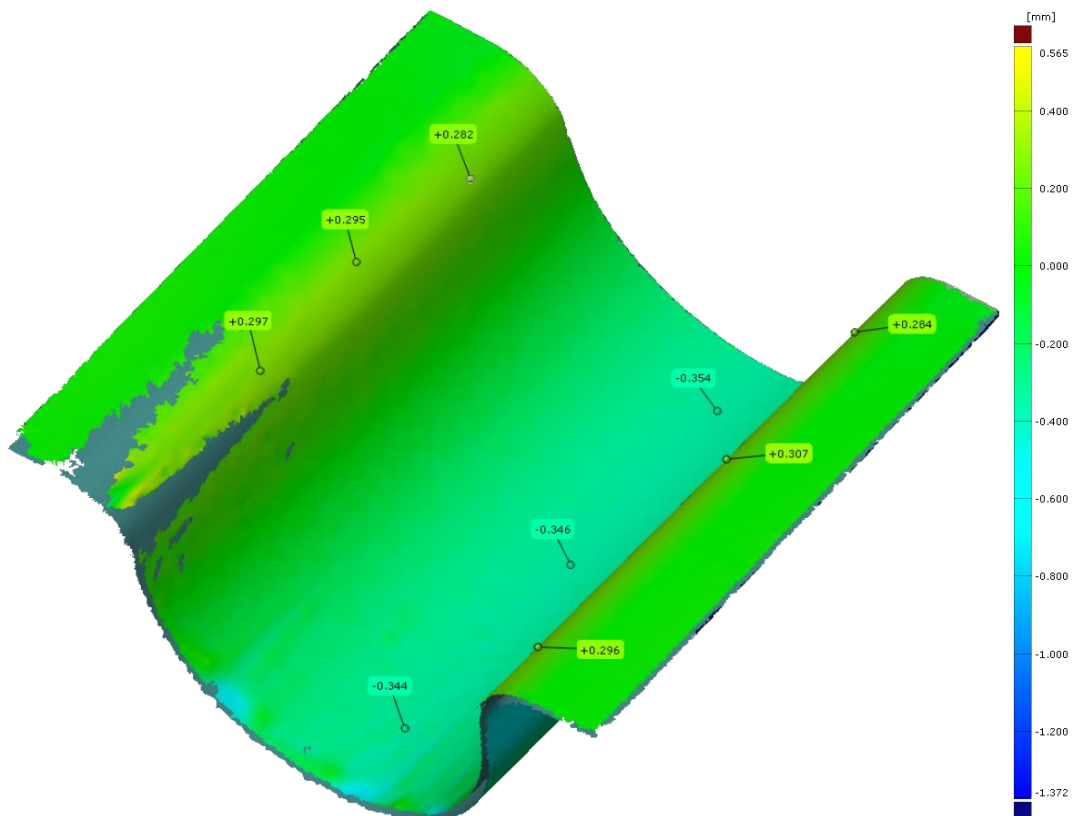


Abbildung 60 Abweichungsanalyse des Zwei-Folien-Laminats 2 mit vorgeformter Folie gegen das CAD-Modell

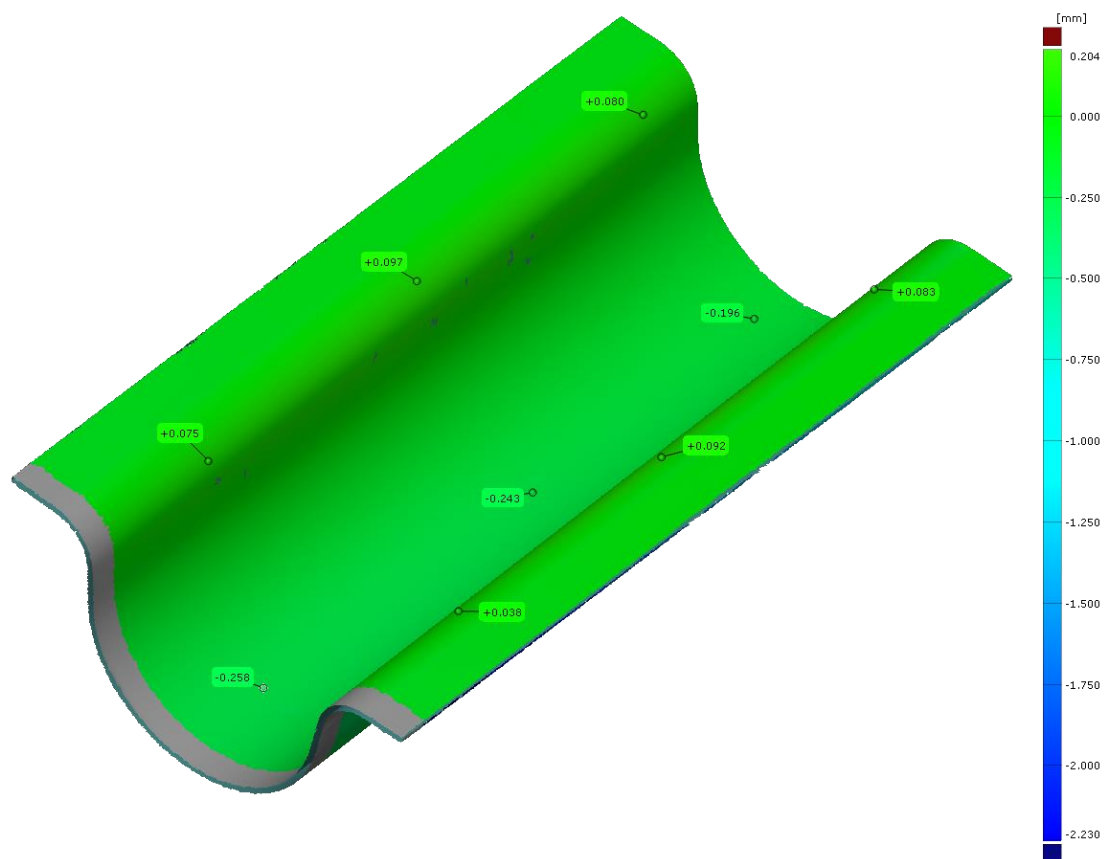


Abbildung 61 Abweichungsanalyse des Zwei-Folien-Laminats mit nicht vorgeformter Folie umgeformt mit Hilfe des Diaphragmas gegen das CAD-Modell

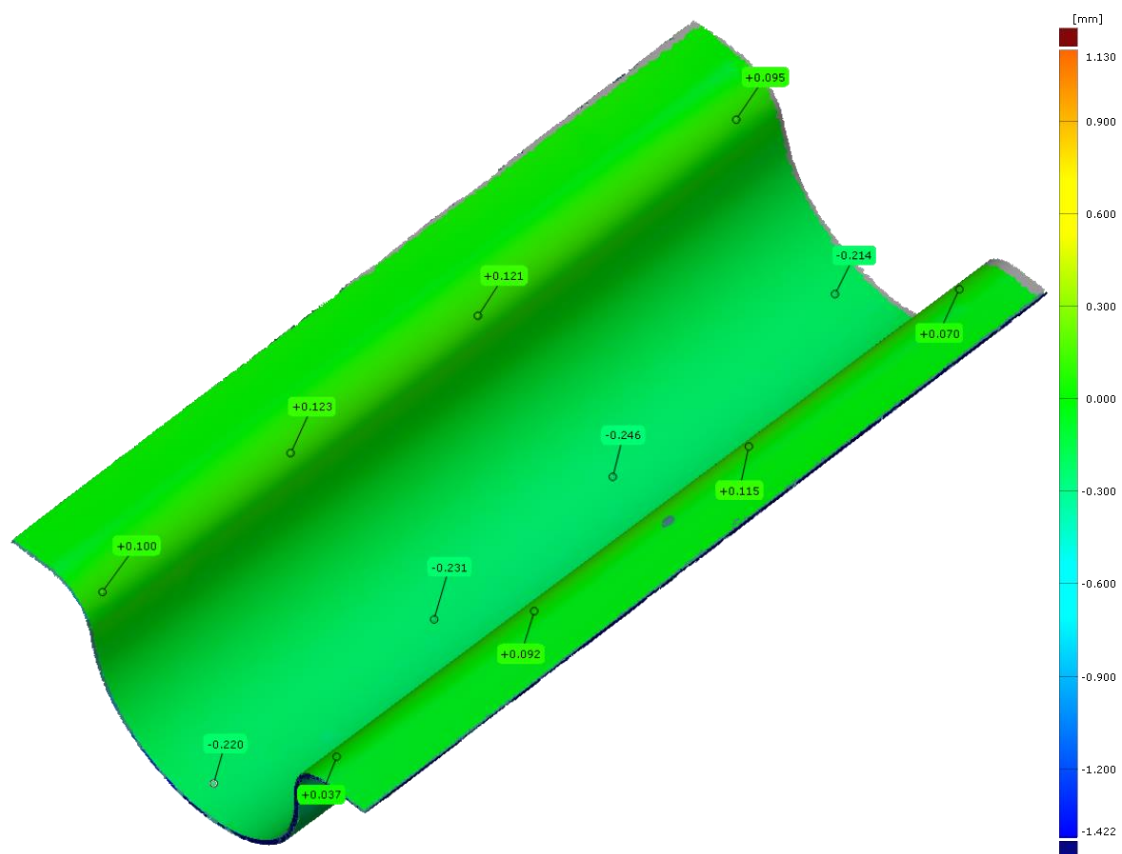


Abbildung 62 Abweichungsanalyse des Zwei-Folien-Laminats mit nicht vorgeformter Folie umgeformt durch das Eigengewicht des Werkzeugs gegen das CAD-Modell